

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Environmentální vědy

Studijní obor: Environmentální vědy



Mgr. Daniel Vondrák

Sedimenty šumavských jezer a jejich využití v paleoenvironmentálním výzkumu
Sediments of Bohemian Forest lakes and their use in paleoenvironmental research

Disertační práce

Vedoucí práce: RNDr. Jolana Tátošová, Ph.D.

Konzultant: prof. RNDr. Evžen Stuchlík, CSc.

Praha, 2019

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 25. června 2019

.....

Daniel Vondrák

Poděkování

V první radě bych rád poděkoval dr. Jolaně Tátošové, bez které by tehdejší zarytý zooplanktonář nikdy nenašel dostatek odvahy a motivace seznámit se s čeledí živočichů, kterou nazýváme pakomárovití (Chironomidae). Jolča mi vedle zápalu pro pakomáry předala také své zkušenosti se studiem jezerních sedimentů, které získala při průkopnické práci na materiálu z Plešného jezera. Prof. Evženu Stuchlíkovi bych rád poděkoval nejen za mnohostrannou podporu v posledních letech, ale také za to, že mne podporoval i v počátcích mého doktorského studia, ačkoliv mou práci tehdy ještě považoval za slepou uličku. Velký dík patří také doc. Güntheru Kletetschkovi, velmi inspirativnímu člověku, díky kterému jsem začal historii naší přírody vnímat v širších souvislostech a naučil se využívat širší spektrum pro paleolimnologický výzkum praktických metod. Jsem mu rovněž vděčný za sdílení jeho zkušeností s publikováním výsledků vědecké práce. Za velmi cenné zkušenosti získané při práci v mezinárodním týmu vděčím doc. Petru Kunešovi. Pod jeho vedením jsem měl možnost zabývat se procesy v povodích šumavských a tatranských jezer, které jsou podmíněny dynamikou přirozených horských lesů v holocénu. Za péči a pomoc v době zahraniční stáže bych rád poděkoval prof. Gautemu Velle a dr. Godtfredu Ankeru Halvorsenovi z Universitetet i Bergen v Norsku. Studium jezerních sedimentů je komplexní disciplína, která předpokládá součinnost odborníků více specializací. Všechny dílčí práce (rukopisy) předkládané disertace jsou proto neodmyslitelně spojeny se spoluprací s mnoha kolegy. Za podporu proto děkuji všem kamarádům, studentům a starším kolegům, kteří mi pomohli dobrou radou a většinou i mnohem více. Mezi nimi bych rád vyzdvihl alespoň spoluautory jednotlivých rukopisů, zejména pak Mgr. Přemysla Bobka, dr. Jennifer L. Clear, doc. Katarínu Holcovou, dr. Barboru Chattovou, prof. Richarda Ch. Chiverrella, dr. Pavla Chvojku, dr. Zuzanu Hořickou, doc. Jaroslava Kadlece, prof. Jiřího Kopáčka, dr. Niinu Kuosmanen, dr. Jiřího Mizeru, Bc. Ladislava Nábělka, dr. Václava Procházku, Mgr. Vladimíra Suchánka, dr. Helenu Svitavskou-Svobodovou, Mgr. Mariana Takáče, dr. Willema O. van der Knaapa a dr. Jacqueline F. N. van Leeuwen. Speciální poděkování patří Mgr. Jolaně Hrubé a MSc. Nicku B. Schafstalovi, se kterými jsem měl to potěšení spolupracovat opravdu intenzivně a na jejichž přátelskou pomoc jsem se mohl vždy spolehnout. Za velkou inspiraci, která mne prováděla mým studiem, děkuji dr. Janu Fottovi a dr. Vojenu Ložkovi, průkopníkům na poli české (paleo)limnologie a kvartérní paleoekologie. Výzkum sedimentů šumavských jezer byl umožněn také díky finanční podpoře Grantové agentury ČR (č. 16-06915S – EUROPIA, č. 16-23183Y – PEDECO a č. 17-05935S – LAYERS), Grantové agentury UK (č. 687012 a č. 884218) a Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy (č. LK21303). Jeho terénní část proběhla za laskavé podpory pracovníků NP a CHKO Šumava a NP Bayerischer Wald. Studium a práce na disertaci by nebyly možné bez mimořádné podpory a trpělivosti mých nejbližších, zejména pak rodičů a přítelkyně Petry. Jim proto patří mé závěrečné poděkování, které však lze jen obtížně popsat slovy.

Věnováno všem, kteří mi během mého studia pomáhali nebo drželi palce.

Obsah

Seznam publikací a rukopisů přiložených k disertační práci a podíl uchazeče na jejich vzniku	9
Abstrakt / Abstract	11
1. Úvod	13
1.1. Zalednění Šumavy v poslední době ledové a vznik glaciálních jezer.....	13
1.2. Možnosti datování sedimentů šumavských jezer	17
1.3. Antropogenní a přirozená acidifikace šumavských jezer	21
1.4. Reprezentativnost zachovávání zbytků organismů v jezerních sedimentech.....	22
2. Cíle disertační práce	24
3. Hlavní výsledky a jejich diskuse	25
3.1. Doba vzniku šumavských jezer.....	25
3.2. Chronostratigrafické markery v pozdně glaciálních sedimentech šumavských jezer	26
3.2.1. Nález tefry Laacher See a YBD horizontu v sedimentech Staré jímky	26
3.2.2. Chemická a mineralogická charakterizace tefry Laacher See a YDB horizontu	28
3.2.3. Doložení tefry Laacher See v sedimentech Rachelsee.....	28
3.3. Přítomnost bioerozních struktur v chitinizovaných zbytcích organismů	30
3.4. Doklady přirozené dystrofie Prášílského jezera	31
4. Závěry	33
5. Seznam citované literatury.....	34
Přílohy	
Rukopis I	
Rukopis II	
Rukopis III	
Rukopis IV	
Rukopis V	
Rukopis VI	
Seznam samostatných elektronických příloh	

Seznam publikací a rukopisů přiložených k disertační práci a podíl uchazeče na jejich vzniku

Rukopis I (publikováno)

Vondrák D., Kopáček J., Kletetschka G., Chattová B., Suchánek V., Tátošová J., Kuneš P. (2019): **Litostratigrafie a stáří sedimentů šumavských jezer: prvotní zhodnocení / Lithostratigraphy and age of the Bohemian Forest lake sediments: A first assessment.** Geoscience Research Reports 52(1): 75–83. DOI: 10.3140/zpravy.geol.2019.13

Podíl D. Vondráka: Student je prvním a hlavním autorem práce, kterou zrealizoval od stanovení cílů přes zpracování a vyhodnocení dat až po sepsání rukopisu a jeho provedení recenzním řízením.

Rukopis II (publikováno)

Kletetschka G., **Vondrák D.**, Hrubá J., Procházka V., Nábělek L., Svitavská-Svobodová H., Bobek P., Hořícká Z., Kadlec J., Takáč M., Stuchlík E. (2018): **Cosmic-Impact Event in Lake Sediments from Central Europe Postdates the Laacher See Eruption and Marks Onset of the Younger Dryas.** The Journal of Geology 126 (6): 561–575. DOI: 10.1086/699869

Podíl D. Vondráka: Student je druhým autorem práce kvůli jeho významnému podílu na jejím vzniku. Podílel se na stanovení výzkumných cílů, terénních odběrech, provedl analýzu zbytků pakomárovitých a pomohl zrealizovat analýzu zbytků perlooček. Podílel se rovněž na přípravě vzorků na XRF skenování a další analýzy, provedl analýzu ztráty žíháním a korelaci všech paralelních jader. Dále se významně podílel na interpretaci výsledků a přípravě rukopisu, a to včetně jeho přepracovávání během recenzních řízení.

Rukopis III (publikováno)

Procházka V., Mizera J., Kletetschka G., **Vondrák D.** (2019): **Late Glacial sediments of the Stará Jímka paleolake and the first finding of Laacher See Tephra in the Czech Republic.** International Journal of Earth Sciences (Geologische Rundschau) 108: 357–378. DOI: 10.1007/s00531-018-1658-y

Podíl D. Vondráka: Student se podílel na terénních odběrech, přípravě vzorků pro potřebné analýzy a myšlenkovém zacílení studie. Provedl analýzu ztráty žíháním a korelaci paralelních jader. Následně se podílel na vyhodnocení výsledků, přípravě rukopisu a jeho úpravách v průběhu recenzního řízení.

Rukopis IV (publikováno)

Kletetschka G., **Vondrák D.**, Hrubá J., van der Knaap W. O., van Leeuwen J. F. N., Heurich M. (2019): **Laacher See tephra discovered in Bohemian Forest, Germany, east of the eruption.** Quaternary Geochronology 51: 130-139. DOI: 10.1016/j.quageo.2019.02.003

Podíl D. Vondráka: Student se podílel na myšlenkovém zacílení plánované práce, hledání způsobů její realizace a na komunikaci se zahraničním partnerem. Dále připravoval vzorky na geochemické analýzy a na analýzu pylovou, provedl litologický popis jader a pracoval s databází Tephabase. Podílel se na interpretaci výsledků, psaní rukopisu a jeho úpravách během recenzních řízení.

Rukopis V (v recenzním řízení)

Holcová K., Suchánek V., Heřmanová Z., **Vondrák D.** (v recenzním řízení): **Evidence of bioerosion in organic walled lacustrine microfossils (Late Pleistocene and Holocene glacial lakes, Bohemian Forest).** Palaios.

Podíl D. Vondráka: Student je korespondenčním autorem práce. Podílel se na terénních odběrech vzorků a jejich laboratorní přípravě pro další analýzy včetně radiouhlíkového datování. Provedl analýzu zbytků chrostíků a významnou měrou se účastnil vyhodnocování výsledků, jejich interpretování a přípravy rukopisu.

Rukopis VI (publikováno)

Vondrák D., Schafstall N. B., Chvojka P., Chiverrell R. Ch., Kuosmanen N., Tátošová J., Clear, J.L. (2019, v tisku): **Postglacial succession of caddisfly (Trichoptera) assemblages in a central European montane lake.** Biologia. DOI: 10.2478/s11756-019-00249-4

Podíl D. Vondráka: Student je prvním autorem práce a jejím iniciátorem. Na přípravě dat a jejich prvotním vyhodnocení rovným dílem spolupracoval s N. B. Schafstallem. Samostatně provedl finální zhodnocení dat, interpretaci výsledků a finalizaci rukopisu. Rukopis následně provedl i recenzním řízením.

Podpis školitele:

.....
RNDr. Jolana Tátošová, Ph.D.

Abstrakt

Sedimenty šumavských jezer jsou důležitými přírodními archivy. Záznam v nich obsažený zachycuje postglaciální historii samotných jezer, stejně jako historii přírodních procesů v širším regionu. Dokládá též lidské osídlení a změny způsobu využívání krajiny. Vědecký zájem tyto sedimenty poutají již od konce 19. století. Ačkoliv moderní paleolimnologický a paleoekologický výzkum započal na Šumavě už ve druhé polovině 20. století, velký potenciál jezerních sedimentů pro rozšíření vědeckého poznání nebyl dosud plně využit. Hlavním cílem této práce je proto prohloubit znalosti o těchto přírodních archivech a podpořit tak jejich využití v budoucích studiích.

Pro dosažení hlavního cíle bylo stanoveno několik cílů dílčích: i) srovnat stáří sedimentů šumavských jezer s publikovanými poznatky o deglaciaci území na konci poslední doby ledové, ii) rozšířit metodické možnosti datování pozdně glaciálních sedimentů o chronostratigrafické markerové horizonty, iii) posoudit vliv bioeroze chitinizovaných subfosilních zbytků vodních bezobratlých živočichů na reprezentativnost dochovaného záznamu a iv) ověřit předpoklad o dystrofním charakteru jezer v průběhu holocénu prostřednictvím analýzy subfosilních zbytků chrostíků (Insecta: Trichoptera). S ohledem na naplnění uvedených cílů byly studovány sedimenty ze čtyř jezer (jezero Laka, Plešného jezera, Prášílského jezera a Rachelsee) a jednoho zazemněného jezera (Stará jímka), a to za využití multi-proxy přístupu.

Na základě získaných výsledků jsem dospěl k závěrům, že doba počátku sedimentace v šumavských jezerech se může odlišovat od stáří morén, které jezera hradí. Nejstarší sledy jezerních sedimentů pokrývají období celého pozdního glaciálu. Ve vrtech ze Staré jímky a Rachelsee byly nalezeny dva chronostratigrafické markerové horizonty – sopečný popel (tefra) z erupce Laacher See a vrstva obsahující sklovité mikrosferule bohaté na železo, které jsou často interpretovány jako doklad impaktní události na počátku mladšího dryasu. Oba markery mohou značně zpřesnit datování (tj. snížit statistickou nejistotu spojenou s výpočtem stáří) studovaných sedimentární záznamů. U chitinizovaných zbytků bezobratlých živočichů (kokony ploštěnek a čelní štítiky chrostíků) z jezera Laka, Prášílského jezera a Staré jímky byly rozlišeny čtyři typy poškození mikroorganismy – jednoduché otvory, jednoduché meandrující chodby, hvězdčité chodby a abraze. Tyto struktury byly pozorovány u ~10 % mikrofosilií a představují první doklad bioeroze chitinizovaných pozůstatků organismů ve čtvrtohorních jezerních sedimentech. Z celkově dobrého zachování zbytků lze usuzovat na přítomnost anoxických podmínek u dna jezer či na dostatečně vysokou sedimentační rychlost. Zbytky chrostíků jsou v paleolimnologických studiích využívány jen vzácně. Úspěšné provedení jejich taxonomické analýzy v případě záznamu z Prášílského jezera dokládá, že mohou posloužit jako cenné biologické proxy. Rekonstrukce sukcese fauny chrostíků v Prášílském jezeře jasně ukazuje známky přirozené acidifikace a dystrofie v oblasti Šumavy již od hranice pleistocén–holocén. Dosažené výsledky mohou být využity jako referenční data pro hodnocení biologického zotavování tohoto jezera.

Předkládaná práce přináší nový vhled do historie šumavských jezer a jejich povodí. Budoucí studie budou moci využít skutečnosti, že se na většině lokalit nachází holocénní a pozdně glaciální sedimenty, které se vyznačují dobře zachovanými chitinizovanými subfosilními zbytky organismů a přítomností dvou chronostratigrafických markerů. Tyto markery dosud nebyly nikdy doloženy společně na jediné lokalitě a v ČR nebyly doloženy ani jednotlivě. Jejich pomocí lze srovnávat paleolimnologické záznamy ze šumavských jezer s přírodními archivy z geograficky vzdálených oblastí.

Abstract

Sediments of Bohemian Forest lakes are important natural archives. Their sedimentary record covers postglacial history of the lakes as well as history of natural processes in a wider region. It also documents local settlements and changes in landscape management. The lake sediments have attracted the interest of the scientific community since the end of the 19th century. Despite of the fact that modern paleolimnological and paleoecological investigations were already performed in the second half of the 20th century in the Bohemian Forest Mts., the great potential of the lake sediments was not fully utilized in scientific research so far. The ultimate objective of this thesis is to deepen knowledge of these natural archives and support their utilization in future studies.

Several specific objectives have been set to achieve the ultimate objective: i) to compare age of the Bohemian Forest lake sediments with the recent knowledge of local deglaciation at the end of the last ice age, ii) to integrate chronostratigraphic marker horizons as one of the tools of Late Glacial sediment dating, iii) to assess the role of bioerosion in chitinous subfossil freshwater invertebrate remains on the record representativeness, and iv) to prove the presumed dystrophic nature of the lakes during the Holocene using analysis of subfossil caddisfly (Insecta: Trichoptera) remains. To fulfil the objectives, lake sediment cores from four lakes (Laka Lake, Plešné Lake, Prášílské Lake, and Rachelsee) and one infilled lake (Stará Jímka) were studied using a multi-proxy approach.

Based on the results, I conclude that the age of sedimentation onset in Bohemian Forest lakes may differ from age of the moraines damming the lake water. The oldest sequences of lake sediments cover at least the whole Late Glacial period. In cores from Stará Jímka and Rachelsee, two chronostratigraphic marker horizons were identified – a volcanic ash (tephra layer) from the Laacher See volcanic eruption and a layer containing glassy iron-rich microspherules often interpreted as evidence of an extraterrestrial impact event at the Younger Dryas onset. Both markers can considerably improve dating precision (i.e. to decrease statistical uncertainty associated with an age estimate) of the studied sedimentary records. In the chitinous invertebrate remains (microturbellaria cocoons and caddisfly frontoclypeal apotomes) from Laka Lake, Prášílské Lake, and Stará Jímka, four morphological types of microboring structures were distinguished – simple holes, meandering tunnels, asterisk-like tunnels, and abrasions. These structures were observed in ~10% of the microfossils and provide the first evidence of bioerosion of chitinous remains in Quaternary lake sediments. The overall good microfossil preservation suggests near-bottom anoxic conditions or sufficiently high sedimentation rate. Caddisfly remains are rarely used in paleolimnological studies. A successful taxonomic analysis of these remains in sediments of Prášílské Lake underlines their importance as one of the valuable biological proxies. The reconstruction of caddisfly fauna succession in Prášílské Lake clearly demonstrates signs of natural acidification and dystrophy in the Bohemian Forest region since the Late Pleistocene-Holocene transition. The results can be used as a baseline for assessment of biological recovery in this lake.

This thesis provides a new insight into the history of Bohemian Forest lakes and their catchments. Future studies may benefit, at most of the localities, from the presence of Holocene and Late Glacial sediments characterized by well-preserved subfossil chitinous remains and the two chronostratigraphic markers. These markers have never been documented together at one site and their finding is also the first record in Czechia. They can be used for comparisons of paleolimnological records from Bohemian Forest lakes with natural archives from geographically remote areas.

1. Úvod

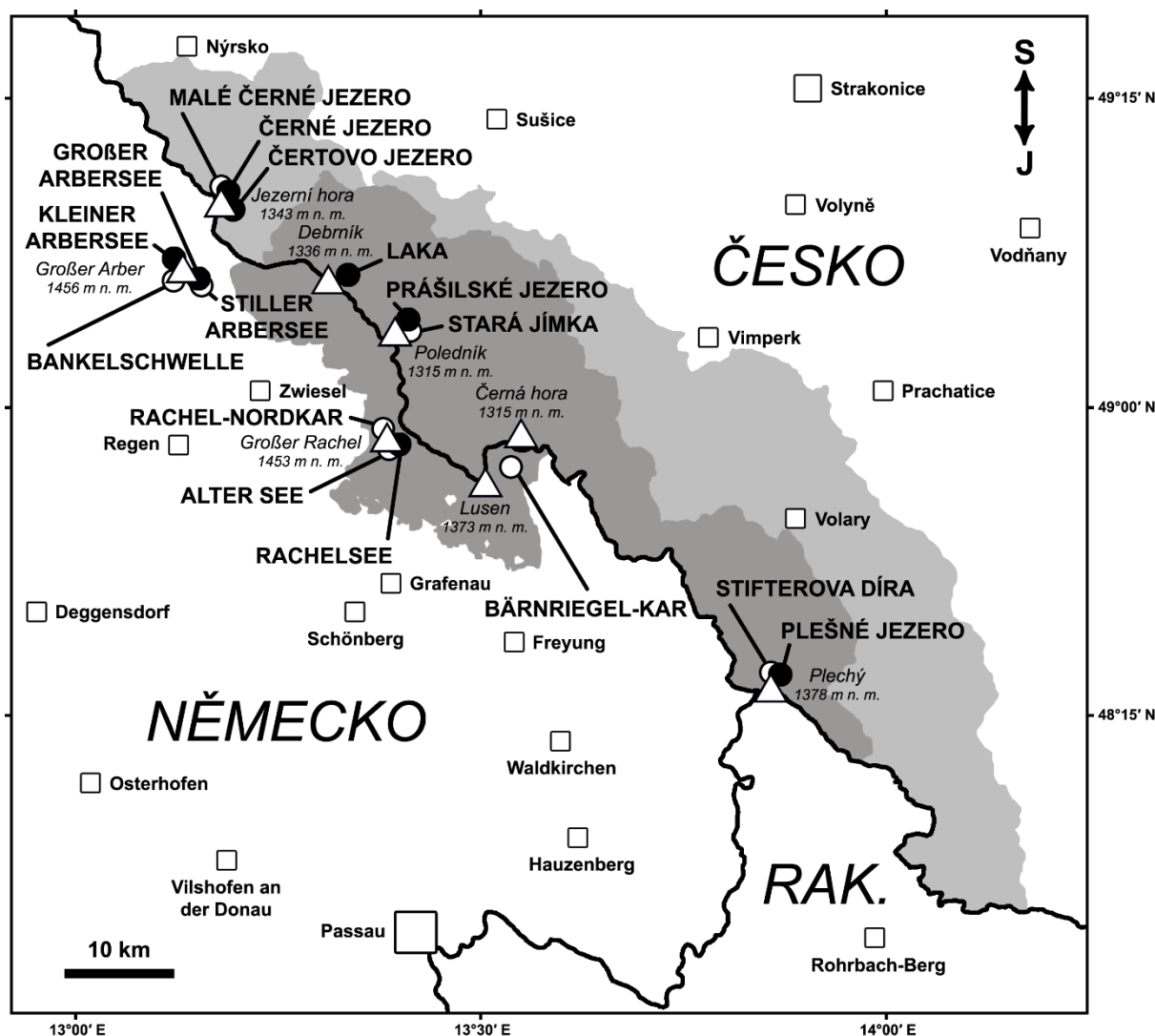
Sedimenty šumavských jezer mají zásadní význam pro poznání proměn naší přírody v nejmladším kvartéru. Jejich výjimečnost spočívá zejména v tom, že jejich prostřednictvím můžeme ve velmi vysokém časovém rozlišení studovat různé procesy, které proběhly za posledních přibližně 15000 roků. Tato skutečnost je důsledkem prakticky kontinuální sedimentace drobných částic v jezerním prostředí, která v jiných přírodních archivech na našem území obvykle chybí. Mezi takové přírodní archivy lze počítat většinu sedimentů vzniklých v jeskynním prostředí, před jeskynními vchody a pod převisy, dále souvrství eolického materiálu (váté písky) a spraše, nejrůznější svahoviny, pramenné vápence, fluviální sedimenty apod. Ve všech těchto typech sedimentů je nutno počítat s častými hiáty, které jsou nejen důsledkem pauz v sedimentaci, ale často též epizodického odnosu části ukládaného materiálu (Ložek 1973, 2007, 2011). Výjimku představují krápníky, ze kterých lze získat i záznamy s ročním rozlišením (např. Liu a kol. 2008, 2017; Wu a kol. 2012). Jejich mimořádný potenciál pro kvartérně orientovaný výzkum však dosud nebyl v ČR, až na ojedinělé výjimky (Kadlec a kol. 2000), využit. Významná jsou rovněž souvrství rašelin, jejichž záznamy však často nepřesahují období holocénu (tj. posledních ~11700 roků) a jsou tvořeny relativně hrubými, málo rozloženými částmi rostlin (např. Ložek 1973; Svobodová a kol. 2002).

Jezerní sedimenty dosahující obdobného (tedy pozdně glaciálního) stáří jsou z našeho území známy i z narůstajícího počtu lokalit, které se nacházejí mimo Šumavu (Vondrák a kol. 2015), a to zejména v Třeboňské pánvi (Hošek a kol. 2016, 2018, 2019). Jen v případě stávajících šumavských jezer však sedimentace dosud přetrvává, díky čemuž lze porovnávat rekonstruované procesy proběhlé v minulosti se současným stavem, který je zdokumentován i přímým pozorováním a měřením (např. Vrba a kol. 2000, 2015). Sedimenty šumavských jezer umožňují, stejně jako u jiných horských jezer (Moser a kol. 2019), nejen detailní studium jejich vlastní historie a historie jejich bezprostředního okolí (např. Bitušík a Kubovčík 2000; Pražáková a kol. 2006; Tátošová a kol. 2006; Carter a kol. 2018b), ale též provedení rekonstrukcí vývoje širšího regionu (např. Veselý 2000). Tento vývoj často odráží i soudobé globální klimatické změny (např. Jankovská 2006; Tátošová a kol. 2006; Kopáček a kol. 2009; Carter a kol. 2018a).

Předkládaná práce by měla prostřednictvím studia šumavských jezerních sedimentů přispět k rozšíření poznání environmetální historie v obou výše zmíněných rovinách – lokální i (nad)regionální. Shrnuje proto dosažené dílčí výsledky (rukopis I až VI) a zasazuje je jak do kontextu dosavadních výzkumů na Šumavě, tak do kontextu širšího. Jejím úkolem je taktéž přinést poznatky o možnostech uplatnění nových metodických přístupů ve studiu sedimentů šumavských jezer, ale i o limitech jejich paleolimnologického výzkumu. Následující podkapitoly úvodu (1.1. až 1.4.) přinášejí krátké rešerše, ze kterých vycházejí cíle práce, jež jsou shrnuty v kapitole 2.

1.1. Zalednění Šumavy v poslední době ledové a vznik glaciálních jezer

Šumava je nevysoké (do 1456 m n. m.) pohoří na trojmezí ČR, Rakouska a Německa (obr. 1). Patří mezi zbytky hercynského horstva, které bylo vyvrátněno před 380 až 300 miliony let (střední devon až svrchní karbon), později denudováno a tektonicky ovlivněno během alpínské orogeneze. Na jeho stavbě se podílejí vyvěrelé a metamorfované horniny prekambriického a paleozoického stáří, které vytvářejí šumavské moldanubikum (Chlupáč a kol. 2002). Přítomnost charakteristických geomorfologických tvarů (kary, morény aj.) v nejvyšších polohách Šumavy vedla již v polovině 19. století k závěrům, že toto území bylo ve čtvrtohorách (tj. v období posledních 2,588 milionu roků) ovlivněno lokálním horským zaledněním, ačkoliv území mezi Alpami a Skandinávským ledovým štítem bylo jinak periglaciální zónou. Průkopníkem této myšlenky byl zejména Joseph Partsch, který obecně



Obrázek 1: Schematická mapa polohy šumavských ledovcových jezer a zazemněných jezer. Plné kruhy představují osm stávajících jezer, prázdné kruhy osm jezer zazemněných, které uvádějí Vondrák a kol. (2019a). Lokality na německé straně Šumavy jsou pouze předpokládanými zazemněnými jezery, jelikož u nich dosud proběhlo jen geomorfologické zhodnocení (Rathsburg 1928; Pfaffl 1986, 1988, 1991, 1997), nikoliv přímé doložení přítomnosti jezerních sedimentů. Trojúhelníky představují významné šumavské vrcholy a čtverce významnější města. Tmavě šedá oblast vyznačuje území národních parků Šumava a Bayerischer Wald, světle šedá CHKO Šumava.

předpokládal možnost přítomnosti ledovců v minulosti i ve středoevropských a západoevropských pohořích, kde tento fenomén kvůli malé nadmořské výšce není v současnosti vyvinut (Partsch 1882). Činnost ledovců pak byla následně dána do souvislosti i se vznikem osmi jezer (např. Bayberger 1886; Frič a Vávra 1898; Švambers 1914a, b), která se na Šumavě dochovala v nadmořské výšce od 917 do 1087 m n. m. (obr. 1; tabulka 1). Pozdější práce tento předpoklad potvrdily (např. Rathsburg 1928; Kinský 1933).

V současnosti je již zřejmé, že horské ledovce v době posledního glaciálu (würm, resp. weichsel) na Šumavě přítomny byly. Nešlo o ledovcovou čapku pokrývající rozsáhlé území, jak předpokládal např. Bayberger (1886), ale o malé údolní či karové ledovce (Raab a Völkel 2003; Mentlík 2004, 2005; Vočadlova a Křížek 2009; Mentlík a kol. 2013; Vočadlova a kol. 2015). V posledním glaciálním maximu se zde sněžná čára nacházela kolem 1290 m n. m. a v návaznosti

na topografii terénu klesala až na úroveň kolem 1020 m n. m. (Steffanová a Mentlík 2007). Otázkou však přesto zůstává přesný rozsah zalednění, datace fází jeho ústupů a možná přítomnost dokladů o zalednění v předcházejících glaciálech. Na geomorfologické tvary stářím potenciálně odpovídající předposlednímu glaciálu (riss, resp. saale) upozorňuje např. Ergenzinger (1967). Také samotné kary přesahují pravděpodobně svým stářím dobu posledního zalednění (Mentlík 2006; Steffanová a Mentlík 2007; Mentlík a kol. 2010). Celkový počet karů a jim podobných útvarů vzniklých erozní činností místních malých ledovců je zatím nejasný, výrazně však přesahuje počet karů s dochovanými jezery (Ergenzinger 1967; Hauner 1980; Vočadlova a Křížek 2009; Křížek a kol. 2012). Glaciální formy v oblasti karů jezer byly rozdílně utvářeny nejen v návaznosti na nadmořskou výšku, rozlohu deflačních plošin a horninové podloží, ale rovněž v návaznosti na odlišnosti ve sklonových charakteristikách, orientaci svahů a přehloubení terénu, které mají vliv na výši tepelného toku (Steffanová a Mentlík 2007; Vočadlova a Křížek 2009). Při vyšším tepelném toku jsou pak rozsah a dopady zalednění menší. Pokud pomineme menšinové názory o velkém rozsahu údolních ledovců v posledním glaciálním maximu (např. Ergenzinger 1967; Hauner 1980), lze konstatovat, že jejich délka na německé straně pravděpodobně nepřesahovala 2,6 km (údolí Kleiner Arbersee) (Raab a Völkel 2003), na české straně asi 2,1 km (údolí Prášilského jezera; Mentlík a kol. 2010). Nejnižší položená koncová moréna (údolí Kleiner Arbersee) zasahuje až do nadmořské výšky 830 m (Raab a Völkel 2002, 2003). V jednotlivých karech byly nicméně doloženy morény odpovídající dvěma či více fázím posledního zalednění (Raab a Völkel 2003; Mentlík 2005; Vočadlova a Křížek 2005, 2009; Mentlík a kol. 2013; Vočadlova a kol. 2015). Mentlík a kol. (2013) se pokusili stanovit stáří těchto morén v údolích jezera Laka a Prášilského jezera. Využili za tím účelem datování pomocí izotopu beryllia ^{10}Be a stejnou metodou získaná publikovaná data z údolí Kleiner Arbersee (Reuther 2007). Jejich výsledky dokládají, že období maximálního zalednění Šumavy proběhlo přibližně mezi 24000 až 19500 cal. yr. BP (kalibrované roky před r. 1950 n. l.), což odpovídá situaci známé z nejbližších střeoevropských pohoří, např. Východních Alp (Reuther 2007) a Krkonoš (Engel a kol. 2014). Následné odlednění bylo přerušeno klimatickými výkyvy kolem 16000 a 14000 cal. yr. BP, kdy vznikly nejmladší šumavské morény (Raab a Völkel 2003; Mentlík a kol. 2013). Morény, které by odpovídaly mladšímu dryasu, poslednímu chladnému výkyvu klimatu před počátkem holocénu (~12800–11650 cal. yr. BP), však doloženy již nebyly (Raab a Völkel 2003; Mentlík a kol. 2013), ačkoliv jsou známy třeba z východně a severně orientovaných karů Krkonoš (Engel a kol. 2014), Tater (Engel a kol. 2015, 2017; Makos a kol. 2018) či Východních Alp (Reuther 2007).

Stáří nejmladších morén hradicích šumavská jezera by proto mělo představovat maximální možné stáří samotných jezer. Podle této představy a na základě interpretace výsledků datování nejmladších morén ^{10}Be Mentlíkem a kol. (2013) lze dojít k závěru, že alespoň část jezer vznikla nejdříve po konci staršího dryasu. Starší dryas (v anglicky psané literatuře uváděn jako Older Dryas či Aegelsee Oscillation) byl asi století trvající chladný výkyv, který skončil před ~13900 cal. yr. BP (Ammann a kol. 2013). Na možné změny velikosti ledovců v důsledku staršího dryasu upozorňuje i Trazcyk (2004) na příkladu Krkonoš. **Prvním dílčím cílem této práce je konfrontovat poznatky o stáří morén dle Mentlíka a kol. (2013) se stářím sedimentů vybraných šumavských jezer, které dosud nebylo dostatečně studováno.** V nejjednodušším případě lze očekávat, že nejstarší jezerní sedimenty se začaly ukládat na sklonku staršího dryasu a jednotlivá jezera se mezi sebou v tomto ohledu neliší.

Při řešení uvedeného dílčího cíle byl zohledněn i fakt, že původních jezer bylo na Šumavě více než stávajících osm. Na české straně pohoří byla dosud zdokumentována tři zazemněná jezera (obr. 1, tabulka 1) – Stará jímka (např. Mentlík a kol. 2010), malé jezero v karu Černého jezera („Malé Černé jezero“; Vočadlova a kol. 2015) a Stifterova díra (Vondrák a kol. 2015). Všechna jsou považována za jezera původně mělká a nelze u nich vyloučit odlišný mechanismus a čas vzniku. Zejména u první jmenované lokality se předpokládá, že se na zahrazení jezera podílely i svahové

procesy v paraglaciální fázi, tedy až po ústupu ledovce (Mentlík a kol. 2010). Na německé straně fenomén zazemněných jezer dosud nebyl detailně studován. Přesto bylo kolem pěti lokalit dle geomorfologických charakteristik označeno za pravděpodobná ledovcová jezera (Rathsburg 1928; Ergenzinger 1967; Pfaffl 1986, 1988, 1991, 1997) (obr. 1).

Tabulka 1: Základní charakteristiky šumavských jezer a zazemněných jezer. Zazemněná jezera na bavorské straně Šumavy nejsou pro jejich malou prozkoumanost zahrnuta. Jednotlivé lokality jsou řazeny dle nadmořské výšky. Literární zdroje: 1 – Vondrák a kol. (2019a), 2 – Šobr a Janský (2016), 3 – Vondrák D. a kol. (nepublikováno), 4 – Vočadlová a kol. (2015), 5 – Soldán a kol. (2012), 6 – Kuneš P. a kol. (nepublikováno), 7 – Vondrák a kol. (2019b), 8 – Carter a kol. (2018a), 9 – Michler (2001), 10 – Veselý (1994, podle Reissinger 1931), 11 – Michler (2000), 12 – Raab a Völkel (2003). Mocnosti sedimentů jsou uvažovány jako délka nejdelšího vrtu získaného v nejhlubší části jezerní pánve. V případě zazemněných jezer zahrnuje i nadložní rašelinné sedimenty. Informace o geologickém podloží byly čerpány z on-line geovědních map České geologické služby přístupných (ČGS) na <<https://mapy.geology.cz/geocr50/>> a Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) přístupných na <https://geoviewer.bgr.de/mapapps/resources/apps/geoviewer/index.html?lang=en&tab=geologie&cover=geologie_guek_200&lod=8>.

Lokalita	Zeměpisná poloha	Nadmořská výška [m n. m.]	Maximální hloubka vody [m]	Plocha jezera [ha]	Plocha povodí [ha]	V podloží převažující horniny	Mocnost sedimentů [m]
Stifterova díra	48°46.59' N 13°51.66' E	~1130 ¹	zazemněné jezero	~0,25 ³	?	granit	≥4,0 ³
Stará jímka	49°4.02' N 13°24.25' E	~1110 ¹	zazemněné jezero	~4,5—6,7 ³	~116—143 ³	pararula, migmatit, kvarcit	≥10,6 ³
Plešné jezero	48°46.57' N 13°51.89' E	1087,0 ²	17,7 ²	7,2 ²	67 ⁵	granit	≥5,5 ¹
Laka	49°6.65' N 13°19.69' E	1084,9 ²	3,5 ²	2,6 ²	102 ⁵	parula, migmatit, granodiorit	≥8,8 ⁶
Prášílské jezero	49°4.52' N 13°24.00' E	1079,0 ²	17,2 ²	4,2 ²	65 ⁵	pararula, kvarcit, granit	≥2,2 ^{1,7,8}
Rachelsee	48°58.50' N 13°24.11' E	1070,7 ²	13,3 ²	4,8 ²	58 ⁵	pararula	≥11,8 ⁸
Malé Černé jezero	49°10.95' N 13°10.80' E	1028,0 ²	zazemněné jezero	~0,5 ⁴	?	svor	≥5,2 ⁴
Čertovo jezero	49°9.90' N 13°11.79' E	1027,2 ²	35,4 ²	10,7 ²	89 ⁵	pararula, svor	>5,0 ⁹
Černé jezero	49°10.77' N 13°10.98' E	1007,5 ²	40,1 ²	18,8 ²	124 ⁵	svor, pararula	≥15,3 ¹⁰
Großer Arbersee	49°5.92' N, 13°9.20' E	935,0 ²	16,5 ²	10,5 ²	258 ⁵	pararula	>4,1 ¹¹
Kleiner Raachelsee	49°7.64' N 13°7.17' E	917,2 ²	9,7 ²	9,4 ²	279 ⁵	pararula	≥10,7 ¹²

1.2. Možnosti datování sedimentů šumavských jezer

Sedimenty šumavských jezer vzbudily první vědecký zájem již v závěru 19. stol. Tehdy Frič a Vávra (1898) odebrali vzorky z povrchu dna v nejhlubších částech Černého a Čertova jezera a popsali v nich přítomnost pylu, rostlinných makrozbytků, schránek krytenek, gemulí sladkovodních hub a zbytků perlooček a lasturnatek. Dále nechali u těchto sedimentů analyzovat chemické složení a druhové složení nalezených valv rozsivek. Potřebu využít šumavské sedimenty pro rekonstrukce paleoenvironmentálního vývoje v čase však přinesly až výrazně pozdější výzkumy. Zásadní vlna zájmu o jejich studium se v případě jezer na bavorské straně Šumavy objevila na počátku 80. let 20. století (Krause-Dellin a Steinberg 1984, 1986; Steinberg a kol. 1988). Na české straně se projevila jen s několikaletým zpožděním (spoluinicioval ji Roland Schmidt z Limnologického ústavu Rakouské akademie věd v Mondsee) a kulminovala v první polovině 90. let (např. Schmidt a kol. 1993; Facher a Schmidt 1996; Břízová 1996; Veselý 1998; 2000). Důvodem byl výzkum tehdy vrcholící antropogenní acidifikace povrchových vod a půd (např. Fott a kol. 1994; Veselý 1994) a sociálně-politické změny, které umožnily intenzivnější vědeckou práci v armádou tehdy kontrolované oblasti kolem státní hranice. Nezbytnou součástí těchto novodobých výzkumů bylo již i stanovení stáří studovaných vrstev. To je nutno provádět u každého vrtu (pozn.: termín vrt je v textu používán ve smyslu angl. slova core, v češtině též kór či jádro), neboť sedimentační rychlost je u jednotlivých šumavských jezer různá, a to i když ji uvažujeme jen pro nejhlubší části jezerních pánví (tabulka 1). Značné rozdíly v sedimentační rychlosti lze ale logicky očekávat i napříč každou jezerní pánví (např. Pokorný 2002; Miha-Pintilie a kol. 2016)

Stanovení absolutního stáří vzorků sedimentů šumavských jezer je založeno primárně na metodě radiouhlíkového datování, která využívá přirozený rozpad radioaktivního izotopu uhlíku ^{14}C . Ten je produkován v atmosféře, zabudováván prostřednictvím CO_2 do těl primárních producentů a následně i do vyšších úrovní potravního řetězce. Po úhynu organismů, jejichž zbytky mohou být v sedimentech deponovány, přestane být ^{14}C z vnějšího prostředí doplňován a jeho aktivita klesá v důsledku radioaktivní přeměny (Libby a kol. 1949; Světlík a kol. 2009). Vzhledem k nerovnoměrné produkci ^{14}C v atmosféře v čase je nutná kalibrace radiouhlíkového (^{14}C) datování prostřednictvím kalibračních křivek (Reimer a kol. 2013). V případě studia nejmladších sedimentů odpovídající ukládání v posledních ~130 rocích, kde ^{14}C datování není obvykle dostatečně přesné, je využívána metoda založená na radioaktivním rozpadu izotopu olova ^{210}Pb za kontrolního stanovení aktivity izotopů cesia ^{137}Cs a americia ^{241}Am napříč studovaným sledem vrstev (Appleby a Oldfield 1978; Appleby 1998). Kombinaci výše zmíněných přístupů lze dobře uplatnit u holocénních sedimentů (~11650 cal. yr. BP až současnost), nikoliv však při datování sedimentů starších, tedy pozdně glaciálních. Pozdně glaciální sedimenty šumavských jezer se vyznačují vysokým podílem anorganické hmoty a prakticky v nich zbytky terestrických rostlin či hmyzu (Michler a Kadlubowska 1989; Michler 2000a, b, 2001; Raab a Völkel 2003; Pražáková a kol. 2006; Vočadlova a kol. 2015), které jsou pro ^{14}C datování nejvhodnější. Jejich stáří tak bylo dosud spíše jen odhadováno, a to zejména na základě výsledků pylové analýzy a jejich srovnání s datovanými sukcesemi vegetace z jiných lokalit v regionu (Michler 2000a, 2001; Jankovská 2006) či na základě obsahu organické hmoty (Kadlubowska a Michler 1989). Alternativní způsob přibližného datování představili Pražáková a kol. (2006), kteří na vzorcích z vrtu z Plešného jezera stanovili koncentraci rubidia (Rb) a její změny v čase interpretovali jako proxy pro změny intenzity eroze v pozdním glaciálu. Peak koncentrace Rb ztotožnili se suchými a chladnými výkyvy klimatu, které byly zdokumentovány ve vrtech v Grónském ledovém štítu Stuiverem a kol. (1997). Slabinou této metody je však předpoklad malých změn sedimentační rychlosti v čase a zejména předpoklad, že koncentrace rubidia je ovlivňována výhradně změnami klimatu na severní polokouli. Je přitom známo, že tento parametr může být ovlivněn i lokálními událostmi, např. povodněmi (Schillereff a kol. 2014). Jiným přístupem je datování pomocí opticky

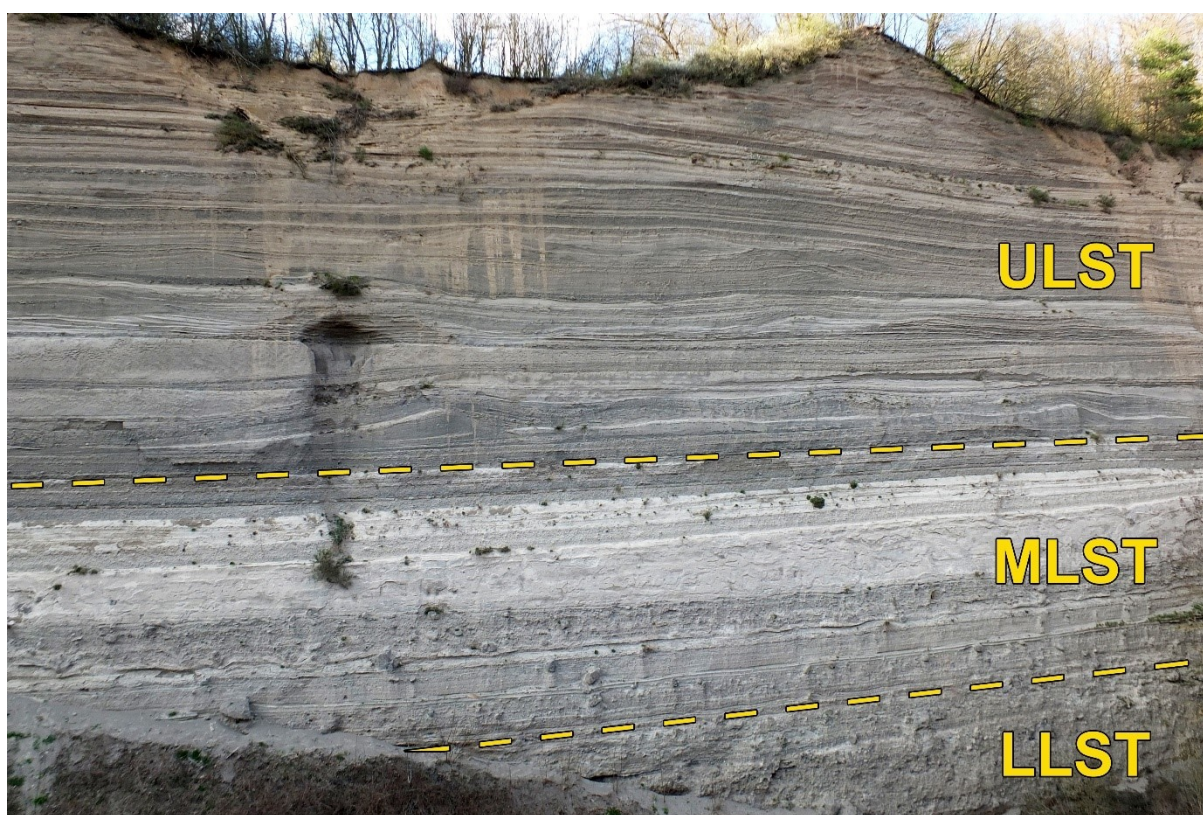
stimulované luminiscence (Lian a Roberts 2006; Fuchs a Owen 2008), které využili Vočadlova a kol. (2015). Jejich měření však byla zatížena příliš velkou, nicméně v této metody běžnou, nejistotou ~ 1400 až 2000 roků. Výsledky tak pouze potvrdily, že dané vzorky mají stáří odpovídající pozdnímu glaciálu či závěru pleniglaciálu (tj. vrcholnému glaciálu). Vzhledem k výše zmíněným úskalím a díky postupnému snižování nároků na hmotnost vzorků datovaných pomocí ^{14}C za využití urychlovačové hmotnostní spektrometrie (angl. accelerator mass spectrometry – AMS), byly pro ^{14}C datování šumavských sedimentů v posledních letech využívány i vzorky typu bulk, tedy v sedimentu obsažený nespecifický organický uhlík, či z bulk extrahovaný pylový koncentrát (např. Raab a Völkel 2003; Vočadlova a kol. 2015; Carter a kol. 2018a). Takové analýzy lze provést i u materiálu s nízkým obsahem organické hmoty, otázkou je však kvalita datovaných vzorků. Vhodným doplněním při datování šumavských jezerních sedimentů by proto byla případná existence markerových horizontů o známém stáří. Jejich začlenění do časově-hlubkových modelů pro konkrétní vrty by vedlo ke zpřesnění určení stáří jednotlivých studovaných vrstev.



Obrázek 2: Kráterové jezero Laacher See vzniklé po výbuchu stejnojmenného vulkánu (stáří ~ 12900 cal. yr. BP, Vulkanický Eifel / Vulkaneifel, Německo). Zúžení uprostřed jezera dokládá skutečnost, že vodní plocha vyplňuje dva spojené krátery. Současná plocha vodní hladiny $3,31 \text{ km}^2$, maximální hloubka 52 m. Foto: D. Vondrák.

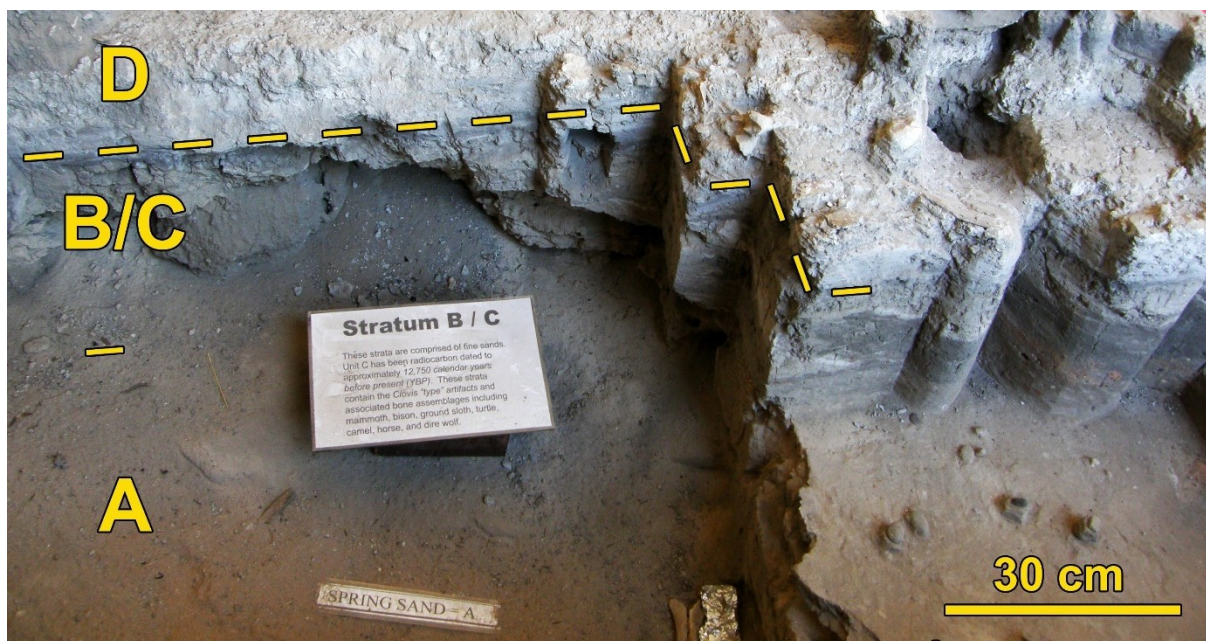
Mezi významné chronostratigrafické markery patří zejména vrstvy sopečného popela, tzv. tefry. Ty odpovídají konkrétní erupci, k níž mohou být za využití mineralogických a geochemických charakteristik přiřazeny (Davies a kol. 2002; Lowe 2011; Davies 2015; Lane a kol. 2017). Vyvržený sopečný materiál může být atmosférickou cestou transportován na velké vzdálenosti (až tisíce kilometrů od epicentra; např. Jensen a kol. 2014), a tak tefry nalézáme na rozsáhlých územích (Davies 2015). Jen v Evropě je pro období od vrcholu posledního glaciálu do počátku holocénu významných tefer známo několik desítek (Davies a kol. 2002; Bronk Ramsey 2015), žádná však dosud nebyla nalezena na našem území. Jejich původ je spojen se čtyřmi hlavními oblastmi aktivního vulkanismu, kterými jsou Island, Francouzské středohoří (Massif Central), Itálie a Eifel (Davies a kol. 2002). Z nich právě Eifel je Šumavě geograficky nejbližší. K poslední velké erupci došlo v Eifelu asi 12900 cal. yr. BP v blízkosti dnešního Koblenze (Koblenz) v západní části Německa (van den Boggard a Schmincke 1984; Wörner a Schmincke 1984; Hajdas a kol. 1995; Schmincke a kol. 1999). Tato katastrofická erupce v místě dnešního kráterového jezera Laacher See (obr. 2) bývá přirovnávána k erupci Mount Pinatubo na Filipínách v r. 1991 (jejich srovnání uvádí např. Schmincke a kol. 1999 a Riede 2016). Předpokládá se, že v několika fázích erupce (obr. 3), jež byly pliniovského a freatomagmatického typu, bylo do atmosféry uvolněno 20 km^3 tefry (objem odpovídá $6,3 \text{ km}^3$ původního magmatu)

a nejméně 2 Mt síry (Schmincke a kol. 1999; Harms a Schmincke 2000). Přilehlé oblasti byly postiženy přímou destrukcí (asi 1400 km² okolní krajiny bylo pokryto vrstvou popela o mocnosti 1 až více než 50 m; obr. 3) a území dál po proudu Rýna katastrofickými povodněmi, které se projevy až v oblasti dnešního Lamanšského průlivu (van den Bogaard a Schmincke 1984; Schmincke a kol. 1999; Riede 2016). Někteří autoři událost dávají do souvislosti se následným zhoršením klimatu (Schmincke a kol. 1999; Graf a Timmerneck 2001; Baldini a kol. 2018) a negativním vlivem na lidské osídlení (Riede 2016; Riede a kol. 2016). Tradičně přejímaná představa o tom, že dálkový transport tefry z jednotlivých fází erupce probíhal jen jižním (zejména severní a jihozápadní Německo, severní Francie, Švýcarsko) a severovýchodním směrem (zejména střední a severovýchodní Německo, severozápadní Polsko) (van den Bogaard a Schmincke 1985) je pravděpodobně zjednodušující (Riede a kol. 2011). Důvodem je i její částečné ovlivnění dřívějším geopolitickým rozdělením Evropy, kdy výzkumy nemohly být realizovány z geografického pohledu rovnoměrně (Schmincke a kol. 1999). Nelze proto vyloučit, že k šíření tefry Laacher See došlo i přímo na východ, tedy směrem k Českému masivu.



Obrázek 3: Souvrství vulkanického popela (tefry) z erupce Laacher See na lokalitě Wingertsbergwand (Vulkanický Eifel / Vulkaneifel, Německo). Tento 40 m mocný profil se nachází 1,3 km od současného břehu jezera Laacher See. Zkratky označují tefry ze tří hlavních fází erupce (dělení dle van den Bogaard a Schmincke 1984 a Schmincke a kol. 1999): LLST – spodní Laacher See tefra (Lower Laacher See tephra), MLST – střední Laacher See tefra (Middle Laacher See tephra), ULST – svrchní Laacher See tefra (Upper Laacher See tephra). Nálezy tefry Laacher See v šumavských jezerech uváděné v této práci (Kletetschka a kol. 2018, 2019; Procházka a kol. 2019; resp. rukopis II, IV a III) odpovídají MLST. Foto: D. Vondrák.

Druhým chronostratigrafickým markerem, jehož možné přítomnosti je věnována tato práce, je tzv. YDB (Younger Dryas Boundary) horizont. Jeho stáří bylo stanoveno za využití záznamů ze 23 lokalit Kennetem a kol. (2015) na 12835–12735 cal. yr. BP (jde o 95,4% interval spolehlivosti



Obrázek 4: Profil na lokalitě Blackwater Draw 1 (Nové Mexiko, USA) obsahující YDB horizont (dle Wittke a kol. 2013). Přerušovaná žlutá čára vyznačuje polohu tohoto horizontu (mocnost 1 cm) a zároveň přechod (C/D) mezi sedimenty odpovídajícími klimatickým obdobím allerødu a mladšího dryasu. A – písek uložený u pravěkého prameniště, B a C – písčité horizont s nálezy kostí velkých savců (tzv. megafauny) a lidských artefaktů lovecko-sběračské kultury Clovis, D – diatomit. Profil je součástí typové lokality kultury Clovis a chráněn v rámci Blackwater Draw National Historic Landmark and Museum. Foto: D. Vondrák.

modelovaného stáří), a tak by i on mohl potenciálně zpřesnit datování pozdně glaciálních sedimentů šumavských jezer. Představa o existenci tohoto horizontu původně vycházela zejména ze studia několika desítek archeologických lokalit v Severní Americe, kde byla nalezena na uhlík bohatá vrstva s částicemi vzniklými při vysokých teplotách, nanodiamanty a neobvyklým prvkovým složením (zejména zvýšená koncentrace prvků platinové skupiny, a to včetně platiny a iridia) (Firestone a kol. 2007). Tato vrstva (tzv. black mat; obr. 4) zároveň tvoří mladší hranici výskytu pozůstatků některých zástupců velké pleistocenní fauny a artefaktů na ní navázaných lovecko-sběračských kultur (Firestone a kol. 2007; Haynes 2008; Wittke a kol. 2013). Časově odpovídá nástupu mladšího dryasu (angl. Younger Dryas; ~12850–11650 yr. cal. BP), posledního velkého klimatického ochlazení před začátkem holocénu (např. Rasmussen a kol. 2014; Kennett a kol. 2015). Kombinace uvedených skutečností vyústila ve formulování tzv. Younger Dryas impact hypothesis (tj. hypotézy impaktu na počátku mladšího dryasu), která záznamy interpretuje jako důsledek kolize Země s planetkou či kometou, jež způsobila rozsáhlé požáry a další významné environmentální změny na několika kontinentech (Firestone a kol. 2007; Israde-Alcántara a kol. 2012; Wittke a kol. 2013). Toto alternativní vysvětlení drastické redukce velké fauny a příčiny mladšího dryasu bylo podrobeno četné kritice (např. Pinter a kol. 2011; Boslough a kol. 2012; van Hoesel a kol. 2014; Holliday a kol. 2015, 2016). Navzdory tomu stoupá počet nezávisle studovaných lokalit, na kterých byl doložen podobný záznam (např. LeCompte a kol. 2012; Mahaney a kol. 2013, 2014, 2018a; Petaev a kol. 2013; Wu a kol. 2013; Hagstrum a kol. 2017; Moore a kol. 2017; Israde-Alcántara a kol. 2018; Wolbach a kol. 2018a, b; Pino a kol. 2019). Vedle toho byl nedávno objeven velký impaktní kráter (průměr 31 km) kvartérního stáří v SZ Grónsku (Kjær a kol. 2018), který může s událostí souviset. YDB horizont proto, i přes pokračující debatu o procesech, které stály za jeho vznikem, stále zůstává potenciálním globálním chronostratigrafickým markerem, jenž by mohl být využíván pro identifikaci počátku

mladšího dryasu. V Evropě byla této problematice dosud věnována, ve srovnání se Severní Amerikou, jen malá pozornost. Studovány byly zejména nepočetné záznamy v paleopůdách (např. Wittke a kol. 2013; Wu a kol. 2013; Mahaney a kol. 2017, 2018b). Nabízí se proto ověřit možnou přítomnost YDB horizontu ve středoevropských přírodních archivech poskytujících vysoké časové rozlišení, např. v jezerních sedimentech.

Druhým dílčím cílem této práce je proto prověřit možnou přítomnost tefry Laacher See a YDB horizontu v sedimentech šumavských jezer. Pozitivní nálezy by byly první svého druhu a umožnily by nejen přesnější datování studovaných vrtů, ale i navázání získaných paleoenvironmentálních záznamů na obdobné záznamy z geograficky vzdálených oblastí.

1.3. Reprezentativnost zachování zbytků organismů v jezerních sedimentech

Jezerní sedimenty bývají mimořádně bohaté na pozůstatky terestrických a zejména vodních organismů. Tuto jejich vlastnost lze uplatnit zejména v paleoekologicky zaměřených studiích. V optimálním případě je cíleno na takové pozůstatky, které umožňují co nejdetailnější taxonomické zařazení a které jsou ve vzorcích sedimentu početné. Důležitá je i dobrá znalost ekologických nároků současných druhů dané skupiny organismů a jejich bioindikační potenciál (Smol a kol. 2001a, b; Elias 2010). Přesto bývá informace o původním prostředí, ve kterém organismy žily, do různé míry zastřena tím, že jejich zbytky nacházíme až po tom, co byly ovlivněny různými procesy během depozice do sedimentu, ale i po ní. Tyto procesy (fyzikální, chemické a biologické) je třeba zohlednit zejména tehdy, když se studie opírá o jediný vrt jezerními sedimenty, což bývá případ nejčastější (Heggen a kol. 2012).

Velmi důležité je v tomto ohledu proudění vody, které zbytky před dosažením jezerního dna transportuje a někdy též mechanicky poškozuje. Je ovlivňováno zejména přítoky, větrem, tvarem jezerní pánve a drsností dna (Rosen 2015). Do jezer se dále dostávají i zbytky z přítoků a z povodí, tedy od těch organismů, které jezero neobývaly. Vedle splachů jsou přinášeny též atmosférickou cestou (Smol a kol. 2001a, b). Všechny zbytky teoreticky mají větší šanci uložit se blízko místa, kde vznikly, než na místě vzdáleném (Heiri 2004; Luoto 2010). Přesto platí, že se zejména ty malé šíří natolik dobře, že lze napříč jezerní pánví získat jejich konzistentní záznamy (Tarrants a kol. 2018). Konzistentnost je zde ale uvažována zejména na úrovni druhů dominantních, u druhů vzácných s ní počítat nelze (Heiri 2004). Srovnatelné dále nebývají záznamy z mělkého litorálu, které jsou často ochuzené o zbytky těl organismů obývajících hlubší partie jezer (Heggen a kol. 2012). U zbytků velkých, a to hlavně těch z organismů žijících v povodí, přítocích či mělkém litorálu, je však jen jejich malá část transportována až do nejhlubší části pánve (de la Riva-Caballero a kol. 2010; Heggen a kol. 2012). Někdy však zjevný rozdíl mezi podobou biologického záznamu v sedimentech a určitým stavem ve skutečném ekosystému pomocí transportu částic v jezeře vysvětlit nelze. Příkladem je třeba obvyklá absence některých tenkostěnných zbytků, jako jsou první a druhé instary pakomárů (Carter 2001; Brooks et al. 2007) nebo krunýře některých rodů perlooček (Szeroczyńska a Sarmaja-Korjonen 2007). Prvním důvodem této disproporce může být chemicky nepříznivé prostředí, ve kterém se někdy rozpouštějí i jinak velmi odolné objekty biologického původu (např. Flower 1993; Mirosław-Grabowska a Niska 2007). Druhou možností představuje degradace způsobená činností mikroorganismů (Swiontek Brzezinska a kol. 2008). Právě poslednímu procesu byla dosud v kontextu paleolimnologie a paleoekologie věnována jen poměrně malá pozornost.

Třetím dílčím cílem disertační práce je ověřit, zda biologická degradace představuje potenciálně významný faktor, který může v sedimentech šumavských jezer ovlivňovat reprezentativnost i u zbytků organismů, které jsou silně chitinizované. Pro tento účel byly vybrány drobné, chitinem zpevněné pozůstatky těl živočichů, u kterých byla následně pozorována možná přítomnost známek tzv. bioeroze, tedy různých poškození mikroorganismy.

1.4. Antropogenní a přirozená acidifikace šumavských jezer

Novodobý výzkum sedimentů šumavských jezer byl do značné míry motivován zájmem o problematiku antropogenní acidifikace (viz kap. 1.2.). Zhruba od poloviny 20. století se ve střední Evropě, podobně jako v Severní Americe (Clair a kol. 2007) či Skandinávii (Moldan a kol. 2001), začaly projevovat důsledky znečištění atmosféry emisemi oxidů síry, oxidů dusíku a amoniaku (např. Fott a kol. 1994; Kopáček a Stuchlík 1994; Stuchlík a kol. 1997; Procházková a Blažka 1999). Toto znečištění bylo zapříčiněno postupným nárůstem objemu spalovaných fosilních paliv v předešlých dekádách (Mylona 1996) a vyústilo ve změny chemismu vod a půd (Norton a kol. 2013). V oblastech s mělkými půdami a kyselými horninami byl zaznamenán návazný negativní dopad na vodní i terestrické ekosystémy (např. Beamish 1976; Bobbink et al. 1998; Lacoul et al. 2011). V případě jezer byla míra postižení odvislá od charakteristik příslušných povodí a jejich schopnosti neutralizovat kyselou atmosférickou depozici (Kopáček a kol. 1995; Majer a kol. 2003; Stuchlík a kol. 2017). Organismy v postižených ekosystémech byly vedle nízkého pH často vystaveny důsledkům oligotrofizace (snížení dostupnosti živin), přímé toxicity iontového hliníku či narušením funkce dýchacích orgánů a mechanismů látkové výměny (Exley a kol. 1991; Kopáček a kol. 2001a; Hořická a kol. 2006; Andrén a Rydin 2012; Stuchlík a kol. 2017).

V rámci střední Evropy patřila k antropogenní acidifikaci zasaženým územím právě i Šumava (Fott a kol. 1994; Vrba a kol. 2003, 2015). První známky okyselení povrchových vod zde byly patrné již v 50. letech 20. století, vrchol acidifikace však nastal až na konci 70. a v první polovině 80. let (Fott a kol. 1994; Procházková a Blažka 1999; Majer a kol. 2003), kdy odhadovaná maxima depozice na základě koncentrací v podkorunových srážkách činila u síranů (SO_4^{2-}) $\sim 165 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{yr}^{-1}$, pro dusičnany (NO_3^-) $\sim 100 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{yr}^{-1}$ a amonné ionty (NH_4^+) $\sim 60 \text{ mmol.m}^{-2}.\text{yr}^{-1}$ (Vrba et al. 2015). Vedle toho dosahovaly celkové koncentrace hliníku na nejpostiženějších lokalitách $\sim 1 \text{ mg.l}^{-1}$ (Vrba a kol. 2000). Změny chemismu vody v přítocích i samotných jezerech vedly k drastickým změnám v jejich oživení (např. Fott a kol. 1994; Veselý 1994; Vrba a kol. 2000; Čtvrtlíková a kol. 2009; Soldán a kol. 2012). Na počátku 90. let 20. století došlo v reakci na snížení emisí oxidů síry a dusíku ke zlepšení chemických parametrů všech sledovaných jezer (Kopáček a kol. 2001b; Vrba a kol. 2015), nicméně biologické zotavování je dosud jen pozvolné (Nedbalová a kol. 2006; Vrba a kol. 2016). Pro posouzení průběhu chemického i biologického zotavování je potřeba porovnat současný stav jezer s jejich stavem před počátkem antropogenní acidifikace. Ačkoliv existují doklady o oživení šumavských jezer z doby před jejím nástupem (např. Hellich 1878; Frič a Vávra 1898; Veselý 1994; Soldán a kol. 2012), není jich mnoho a pocházejí z doby, kdy jezera byla již ovlivňována nejrůznější lidskou činností. Vedle těžby dřeva v povodích a chovu lososovitých ryb šlo zejména o s těmito aktivitami spojené manipulace s výškou vodní hladiny (Frič a Vávra 1898; Švambers 1914a, b; Veselý 1994; Brůna a kol. 2013). I přes nedostatek jednoznačných důkazů jsou šumavská jezera nejčastěji považována za přirozeně dystrofní a původně hostící na nízké pH nepříteli náročné vodní organismy (Vrba a kol. 2000; Soldán a kol. 2012). Pokud jsou tyto předpoklady pravdivé, současné biologické zotavování je a bude limitováno tím, že probíhá v přirozeně kyselých vodách s vysokým obsahem rozpuštěného organického uhlíku.

V podmínkách mírného pásu je vznik přirozeně kyselých vod vázán na přirozenou acidifikaci půd a postupné snižování dostupnosti živin (Salisbury 1922; Boyle 2007). K těmto procesům dochází v průběhu každého interglaciálu (Kuneš a kol. 2011), resp. po posledním odlednění (Engstrom a kol. 2000). V oblastech s kyselými horninami v podloží se může projevit již na počátku holocénu (Birks a kol. 2000; Norton a kol. 2011; Boyle a kol. 2013). S ohledem na horniny dominující v povodí šumavských jezer (tabulka 1) by tento scénář ani zde nebyl překvapivý. **Posledním dílčím cílem disertace je proto posoudit, zda v šumavských jezerech došlo před silnou acidifikací ve 20. století i k acidifikaci přirozené, která byla spojena se vznikem dystrofních podmínek.** Jako nástroj pro

zodpovězení této otázky byla zvolena analýza zbytků chrostíků (Insecta: Trichoptera) zachovaných v jezerních sedimentech. Ačkoliv chrostíci nejsou v paleolimnologických studiích běžně využíváni (Williams 1988), nacházejí často uplatnění při posuzování míry antropogenní acidifikace a následného zotavování (např. Fjellheim a Raddum 1990; Langheinrich a kol. 2002; Braukmann a Biss 2004; Schartau a kol. 2008). Z toho důvodu je jim věnována pozornost i v současném šumavském výzkumu (Soldán a kol. 2012; Ungermanová a kol. 2014; Vrba a kol. 2016).

2. Cíle disertační práce

Hlavním cílem této disertační práce je prohloubit znalosti o přírodních archivech představovaných sedimenty šumavských jezer a podpořit tak jejich využití v budoucím výzkumu. V rámci tohoto úkolu byly stanoveny čtyři cíle dílčí, které odpovídají zaměření jednotlivých podkapitol úvodu (kap. 1.1. až 1.4.). Tyto dílčí cíle byly plněny prostřednictvím testování sedmi níže uvedených hypotéz.

Cíl 1: Konfrontovat stáří sedimentů šumavských jezer s publikovanými poznatky o deglaciaci území.

Hypotéza 1A: Počátek sedimentace v šumavských jezerech se mezi lokalitami neliší. (rukopis I)

Hypotéza 1B: Nejstarší jezerní sedimenty šumavských jezer nepřekračují stáří 14000 yr. cal. BP a odpovídají poslední fázi deglaciaci po skončení staršího dryasu, kterou předpokládají Mentlík a kol. (2013). (rukopis I)

Cíl 2: Rozšířit metodické možnosti datování pozdně glaciálních sedimentů šumavských jezer prostřednictvím identifikace markerových horizontů.

Hypotéza 2A: V sedimentech šumavských jezer je přítomna tefra z erupce Laacher See. (rukopis II, III a IV)

Hypotéza 2B: V sedimentech šumavských jezer je přítomen YDB horizont. (rukopis II a III)

Cíl 3: Posoudit reprezentativnost zachování chitinizovaných zbytků fauny vodních bezobratlých v šumavských jezerních sedimentech z hlediska poškození mikroorganismy (tzv. bioerozí).

Hypotéza 3: Většina chitinizovaných pozůstatků vodních organismů zachovaných v šumavských jezerních sedimentech nese morfologické stopy po degradaci jinými organismy. (rukopis V)

Cíl 4: Využít pozůstatky chrostíků dochované v jezerních sedimentech pro ověření předpokladu o přirozeném dystrofním charakteru šumavských jezer, resp. Prášílského jezera.

Hypotéza 4A: Prášílské jezero bylo v preacidifikačním období obýváno chrostíky dystrofních horských jezer. (rukopis V)

Hypotéza 4B: Fauna chrostíků dokládá, že dystrofie charakterizovala Prášílské jezero již od počátku holocénu. (rukopis VI)

3. Hlavní výsledky a jejich diskuse

Výzkum vycházející z cílů a hypotéz disertační práce (kap. 2.) byl realizován v rámci několika dílčích studií. Ty byly publikovány v podobě čtyř článků v mezinárodních vědeckých periodících s IF (rukopisy II, III, IV a VI) a jednoho článku v recenzovaném periodiku indexovaném v databázi Scopus (rukopis I). U posledního rukopisu (rukopis V) probíhá recenzní řízení v mezinárodním periodiku s IF. Níže jsou představeny a diskutovány hlavní výsledky uvedených prací (kap. 3.1. až 3.4.), které jsou pro zjednodušení jednotně nazývány rukopisy, i když je většina z nich již publikována. Číslování rukopisů je konzistentní s tím, které je použito v přílohách disertace. V případech, kdy je důležitým výsledkem i metodika, jsou krátce zmíněny též analytické přístupy a použité přístroje.

3.1. Doba vzniku šumavských jezer

Otázce stáří šumavských jezer je věnován **rukopis I**. Základem této studie je srovnání výsledků radiouhlíkového (^{14}C) datování, litologických popisů a obsahů organické hmoty u vrtů z pěti lokalit. Toto srovnání upozorňuje nejen na vzájemné rozdíly ve stáří vybraných jezerních sedimentů, ale také na jejich litologické odlišnosti. Vlastní data autorského kolektivu jsou u zmíněných třech charakteristik prezentována pro vrty z Plešného jezera, Prášílského jezera a zazemněného jezera Stará jímka (obr. 1). Stejně charakteristiky pro zazemněné jezero v karu Černého jezera (Malé Černé jezero) a Rachelsee (obr. 1) byly získány z literatury (Kadlubowska a Michler 1989; Vočadlova a kol. 2015). Obsah organické hmoty byl vyjádřen nepřímo prostřednictvím ztráty žíháním (LOI) při teplotě 550 °C.

Ze srovnání získaných záznamů jasně vyplynulo, že se liší především přítomností a mocností fáze odpovídající časově pozdnímu glaciálu (tj. období ~14700–11650 cal. yr. BP). Např. u Rachelsee se podařilo doložit její mocnost přesahující 8,5 m (Carter a kol. 2018a), kdežto u Prášílského jezera chybí. To ukazuje, že obě vodní plochy vznikly v odlišné době. Na případu Prášílského jezera je dále patrné, že stáří šumavských jezer nemusí vždy plně odpovídat stáří jejich nejbližších morén. Počátek sedimentace v Prášílském jezeře totiž odpovídá počátku holocénu, kdežto průměrné stáří morény totéž jezero hradící bylo Mentlíkem a kol. (2013) pomocí ^{10}Be stanoveno na 13700±1300 cal. yr. BP. Hypotéza 1A tedy nebyla potvrzena.

Nejstarší ^{14}C datum získané za využití zbytků terestrických rostlin (jehlice později lokálně vymřelého modřínu opadavého a list břízy trpasličí) pochází ze Staré jímky a má hodnotu 14411–13831 cal. yr. BP (pozn.: zde a dále v textu uvedená rozmezí u výsledků ^{14}C datování vždy odpovídají 95,4% konfidenčnímu intervalu pro kalibrované stáří). Příslušná vrstva se přitom nacházela ještě 40 cm nad bází vrtu. Pokud vedle těchto skutečností zohledníme i nejstarší radiouhlíková data z jiných lokalit získaná ze vzorků typu bulk (Plešné jezero – 15116–14516 cal. yr. BP, Malé Černé jezero – 15532–15146 cal. yr. BP), není pravděpodobné, že v jezerních karech byly ledovce přítomny ještě těsně před 13900 cal. yr. BP (údaj pro svrchní hranici staršího dryasu dle Ammann a kol. 2013), jak usuzují Mentlík a kol. (2013). Spíše lze předpokládat vznik části šumavských jezer v reakci na klimatické oteplení na počátku pozdního glaciálu, jež je datováno ~14700 cal. yr. BP (např. Rasmussen a kol. 2014), nebo i dříve. Rovněž hypotéza 1B proto nebyla potvrzena.

Představu o odlednění Šumavy ještě před počátkem pozdního glaciálu podporuje i fakt, že zde nejsou známy morény odpovídající mladšímu dryasu (Mentlík a kol. 2013; Vočadlova a kol. 2015). Tento klimatický výkyv proběhl přibližně mezi 12800 a 11650 cal. yr. BP a na severní polokouli se projevil jako nejdelší a nejchladnější pozdně glaciální oscilace (Rasmussen a kol. 2014). V blízkých Východních Alpách jsou morény vzniklé v důsledku postupů ledovců v mladším dryasu běžné, zatímco morény odpovídající staršímu dryasu se většinou nedochovaly (Ivy-Ochs a kol. 2008). Možná přítomnost morén ze staršího dryasu a zároveň absence těch z dryasu mladšího uvažovaná v případě

Šumavy Mentlíkem a kol. (2013) proto není příliš pravděpodobná. Alternativní varianta vzniku nejmladších šumavských morén na úplném začátku pozdního glaciálu či nedlouho před ním navíc není v rozporu s výsledky datování pomocí ^{10}Be . Ty jsou totiž představovány poměrně širokými časovými intervaly – 15000–12400 cal. yr. BP pro nejmladší morénu Prášílského jezera a 15300–12700 cal. yr. BP pro nejmladší morénu jezera Laka (Mentlík a kol. 2013).

Prezentované závěry jsou prvním pokusem o zodpovězení otázky stáří šumavských jezer za využití jejich sedimentů odebraných na více lokalitách. Ačkoliv jsou rozdíly mezi lokalitami zjevné, přesnou dobu vzniku většiny jezer dosud nelze stanovit. Brání tomu absence vhodné metody, která by umožnila datovat dostatečně přesně (tj. s chybou v řádu desítek či maximálně prvních stovek roků) báze studovaných vrtů. S ohledem na to není dané téma dosud uzavřeno a měla by mu být věnována další pozornost.

3.2. Chronostratigrafické markery v pozdně glaciálních sedimentech šumavských jezer

Obtíže s datováním dosud neumožňují plné využití pozdně glaciálních šumavských sedimentů v paleoenvironmentálním výzkumu (viz kap. 1.2.). Z toho důvodu byla v rámci překládané práce věnována této problematice největší pozornost. V návaznosti na to vznikly **rukopisy II, III, IV** a částečně též **rukopis I**.

Právě ze závěrů **rukopisu I** vyplývá, že se tyto pozdně glaciální sedimenty od holocénních výrazně liší, a to např. nízkým obsahem organické hmoty, resp. nízkými hodnotami LOI. Jejich nápadný předěl je datován ~11000–11500 cal. yr. BP, a proto může být využit pro hrubé určení stáří této litologické hranice i u nově získaných vrtů. Pro stejné období byl zdokumentován vznik zapojeného lesa v blízkém okolí jezer (např. Jankovská 2006; Carter a kol. 2018a), který vysvětluje snížení přínosu anorganických částic do jezerních pánví, a naopak navýšení přísunu organických látek a zbytků organismů (Kopáček a kol. 2009). Méně nápadný nárůst hodnot LOI byl však doložen už v době pozdního glaciálu a minimálně na Staré jímce (obr. 1) časově dobře odpovídá oteplení klimatu v allerødu (~12800–13900 cal. yr. BP). Už tehdy totiž byl v povodí jezer řídký les, což dokládají nalezené makrozbytky modřínu (**rukopis I**) a borovice (**rukopis II**; nelze však vyloučit, že šlo o keřovitou borovici kleč). Uvedené poznatky však tvoří jen určitou výchozí pozici pro metodické zlepšení možností datování pozdně glaciálních jezerních sedimentů na Šumavě. Klíčovým úkolem proto bylo prověřit možnou přítomnost chronostratigrafických markerů o známém stáří. Pro tyto účely byli jako vhodní kandidáti zvoleni tefra Laacher See a tzv. Younger Dryas Boundary (YDB) horizont (viz kap. 1.2.).

3.2.1. Nález tefry Laacher See a YDB horizontu v sedimentech Staré jímky

Hledání obou markerů – tefry Laacher See i YDB horizontu – je věnován **rukopis II**. Jako nejvhodnější lokalita pro odběr potřebných sedimentů byla vybrána Stará jímka (obr. 1). Důvodem bylo její prokázané pozdně glaciální stáří (Mentlík a kol. 2010) a potřeba získat několik paralelních vrtů, které by poskytly dostatečně velké vzorky pro provedení multidisciplinárního výzkumu při zachování vysokého časového rozlišení. Odběr paralelních vrtů se snadněji realizuje právě u jezer zazemněných.

Získané paralelní vrty (šlo o sekvence 50 cm dlouhých jader) byly napojeny na společnou hloubkovou škálu prostřednictvím detailního rengenfluorescenčního (XRF) skenování (měření v kroku 2 mm). Z objektů dokládanych v YDB horizontech (Firestone a kol. 2007; Bunch a kol. 2012; Wittke a kol. 2013) bylo následně cíleno na mikroskopické sférické částice přetavených materiálů (tzv. MSP). Separace MSP byla provedena dle Israde-Alcántara a kol. (2012) a jejich následná prvková analýza

pomocí skenovací elektronové mikroskopie a energiově disperzní spektroskopie (SEM-EDS). MSP byly nalezeny pouze v 0,5 cm mocném intervalu hloubek, který byl radiouhlíkově datován na 12755 ± 92 cal. yr. BP, což je stáří překrývající se s časovým intervalem udávaným pro tuto událost (Kennett a kol. 2015). MSP mají průměr kolem 20 až 35 μm , kulovitý či kapkovitý tvar a jsou tvořeny železem a kyslíkem s příměsí dalších prvků (zejména hliníku, křemíku a hořčíku). Vzhledem k tomu, že některé MSP mohly být přehlédnuty, je jejich maximální zjištěná koncentrace rovna nejméně 17 kusů na 1 g suchého sedimentu. Jedná se o první doklad YDB horizontu ve střední Evropě (též Vondrák a kol. 2017).

V těsném předstihu před MSP horizontem (resp. 5 cm pod ním) byla identifikována erozní vrstva, které byla interpretována jako možný důsledek klimatického výkyvu zvaného Gerzensee oscilace (Ammann a kol. 2013; van Raden a kol. 2013). Na podobný záznam v sedimentech bývalého jezera Švarcenberk v jižních Čechách již dříve upozornili Hošek a kol. (2014). Mezi touto erozní vrstvou a YBD horizontem byla dále pomocí skenovací elektronové mikroskopie nalezena poloha obsahující úlomky sopečného skla a zvýšenou koncentraci fosforu, niobu a některých prvků vzácných zemin (lanthan, cer). Dle stáří a zejména charakteristického chemického složení (inovativní přístup pomocí analýzy SEM-EDS s následnou kvantifikací analytickým rastrovacím elektronovým mikroskopem s plně hardwarově integrovanými EDS detektory (TESCAN Integrated Minerals Analyser – TIMA, US Patent 20,130,054,153)) byl tento materiál identifikován jako Laacher See tefra (LST) náležející střední fázi erupce stejnojmenného vulkánu (obr. 2 a 3), který se nachází ve Vulkanickém Eifelu (Schmincke a kol. 1999; Riede a kol. 2011; Neugebauer a kol. 2012; Wulf a kol. 2013). Jelikož nález má podobu mikroskopické vrstvy vulkanického popela, která není patrná pouhým okem, lze o něm hovořit jako o kryptotefře (Davies 2015). Jde o první doklad LST v Českém masívu dokazující šíření tefry východním směrem, který nebyl dosud předpokládán (van den Bogaard a Schmincke 1985; Schmincke a kol. 1999). Výše popsány výsledky jsou tedy v souladu s hypotézami 2A a 2B. Dále jde o vůbec první doklad přítomnosti LST a YDB horizontu na jediné lokalitě. Jako takový též ukazuje, že šlo o dvě časově oddělené události.

U obou událostí byl dále předpokládán možný dopad na biosféru. V rámci prvotního zhodnocení (délka časových oken představovaných studovanými vrstvami kolem 40 až 60 roků) byla proto napříč částí sedimentárního záznamu obsahující MSP a LST provedena analýza zbytků vodní fauny (Chironomidae, Cladocera), antrakologická analýza (tj. analýza mikroskopických uhlíků) a pylová analýza. Ve vodním prostředí byly zaznamenány dynamické změny končící obdobím s nižší diverzitou a přítomností bioindikátorů (ultra)oligotrofních podmínek. V terestrickém prostředí byl doložen vývoj směrem k většímu podílu tundrových prvků, nárůstu zastoupení břízy na úkor borovice a nižší požárové aktivity. Tyto změny byly interpretovány jako důsledky zhoršení klimatu na počátku mladšího dryasu. Jezero bylo v této době obýváno faunou, která v současných šumavských jezerech není běžná, a to včetně lokálně vymřelých taxonů – perloočky *Bosmina* (*Eubosmina*) *longispina* a pakomára morfotypu *Micropsectra radialis*-type (cf. Soldán a kol. 2012; Vrba a kol. 2016). Nejblíže analogie takové fauny lze dnes nalézt ve středoevropských velehorách či Skandinávii (např. Faustová a kol. 2011; Heiri a kol. 2011; Stuchlík a kol. 2017). Horizont s LST a zvýšenou koncentrací fosforu se z hlediska zbytků vodních živočichů vyznačoval zejména jejich nejvyššími celkovými počty na jednotku hmotnosti. Tento náznak vyšší produktivity ekosystému však nebyl doprovázen výměnou druhů oligotrofních jezer za druhy úživnějších vod. Téma environmetálních změn v důsledku přírodních katastrof na konci allerødu a na počátku mladšího dryasu by však mělo být studováno podrobněji. Provedená studie v tomto ohledu přináší spíše prvotní vhled do tehdejší dynamiky ekosystémů.

3.2.2. Chemická a mineralogická charakterizace tefry Laacher See a YDB horizontu

Úspěšné doložení tefry Laacher See a YDB horizontu v sedimentech ze Staré jímky (**rukopis II**) nabízí možnost využít tyto chronostartigrafické markery pro zpřesnění datování pozdně glaciálních sedimentů šumavských jezer. Nalezení tefry pomocí SEM a MSP pomocí optické mikroskopie je však v obou případech časově náročné. Vhodným řešením by byla kombinace těchto přístupů s nějakou metodou umožňující automatizovanou nepřímou detekci. Za účelem budoucího nalezení vhodného přístupu byly proto oba horizonty, ale i sediment, který je neobsahoval, chemicky a mineralogicky charakterizovány. Tato charakterizace je popsána v **rukopisu III**.

Vzorky sedimentů ze Staré jímky byly podrobeny XRF skenování, které bylo doplněno o měření pomocí neutronové aktivační analýzy (NAA) a hmotnostní spektrometrie s indukčně vázaným plazmatem (ICP-MS). Tyto sedimenty jsou převážně tvořeny chemicky zvětřalými ($\text{CaO} < 0,20$ hm. %, $\text{Na}_2\text{O} < 0,50$ hm. %) místními metamorfovanými horninami (migmatity, pararuly, svor) (cf. Babůrek a kol. 2006). Ty byly do jezerní pánve transportovány díky činnosti místního malého ledovce a později zejména splachy z povodí. V úseku hloubek odpovídajícímu konci allerødu obsahuje sediment i zvýšené množství organické hmoty (nárůst LOI z 6 % na 14 %; výsledky v detailnější podobě prezentuje **rukopis I**) a valv rozsivek. Použitými metodami se podařilo získat charakteristický chemický záznam pro tefru LST, nikoliv však pro YDB horizont. Horizont obsahující LST je kontrastní zejména díky zvýšené koncentraci sodíku, vápníku, chlóru, niobu a fosforu. Díky tomu by měl být dobře identifikovatelný, na rozdíl od YDB horizontu, i v sedimentech dalších šumavských jezer.

Porózní úlomky sopečného skla odpovídající LST byly dále nedestruktivně analyzovány pomocí elektronové mikrosondy (EMP) s vlnově disperzními spektrometry (WDS). Nalezená alkalická (krypto)tefra odpovídá střední fázi erupce vulkánu Laacher See (MLST), a to zejména její spodní části. Tato tzv. MLST-A fáze je charakteristická nízkým obsahem titanu, hořčíku, železa, relativně nízkým obsahem draslíku, vápníku, fluoru a vysokým obsahem chlóru a manganu (Wörner a Schmincke 1984; Riede a kol. 2011). V případě materiálu ze Staré jímky obsahuje vedle vulkanického skla i drobná zrna s krystalograficky omezenou morfologií. Tyto drobné krystaly vyvřelých hornin (augit, hornblend, bazický plagioklas) byly předběžně interpretovány jako možné pozůstatky starších vulkanických sedimentů. Polohu s tefrou těsně následuje přechod mezi allerødem a mladší dryasem (~ 12800 yr. cal. BP). Ten se vedle poklesu množství organické hmoty vyznačuje i vymizením sulfidů, což dokládá souběžnou změnu redoxních podmínek v tehdejších jezeře. Další, více specifické anomálie poukazující na alochtonní příměs v sedimentu obsahujícím MSP zatím nebyly zjištěny.

Neočekávané je doložené obohacení LST ve Staré jímce o fosfor. Jeho koncentrace dosahuje 2284 ppm (jde o osminásobné navýšení oproti pozadovým hodnotám ve studovaném záznamu), což neodpovídá na fosfor chudým fonolitům z MLST (Wörner a Schmincke 1984). Fosfor zde nicméně není vázán na sopečné sklo, ale na přítomnost matrix obsahující jemný detrit, drobné, částečně mineralizované rostlinné zbytky, výše uvedené drobné krystaly a korodovaný křemen. Pokud je tato matrix alespoň z části opravdu vulkanickým materiálem, nelze vyloučit, že nemá výhradní původ v MLST. Příčiny fosforové anomálie tedy zatím zůstávají nejasné. Obohacení sedimentu pozdně glaciálního jezera o fosfor, by mělo být dále studováno. Jde o důležitou živinu, která mohla za určitých podmínek zásadně ovlivnit oligotrofní prostředí tehdejších jezer (např. Baron a kol. 2000; Bergström a Jansson 2006; Norton a kol. 2011; Stuchlík a kol. 2017), a to nejen na Šumavě.

3.2.3. Doložení tefry Laacher See v sedimentech Rachelsee

Poslední studii, která je věnována otázce datování pozdně glaciálních jezerních sedimentů na Šumavě, je **rukopis IV**. Stanoveným cílem je zde uplatnění poznatků o LST získaných při výzkumu sedimentů Staré jímky (**rukopis II** a **III**; prvotní nález tefry v r. 2014) při datování sedimentů jiné

šumavské lokality. Pro tyto účely byl vybrán sedimentární záznam z Rachelsee. Toto jezero se nachází na bavorské straně Šumavy (obr. 1) a umožňuje tak též zjistit, zda k depozici LST došlo i na jižně orientované straně pohoří. Vedlejším úkolem je prověření příslušnosti případně nalezené LST k fázi MLST (viz kap. 3.2.2.) a možného vlivu erupce Laacher See na vegetaci, která dala vzniknout pylovému záznamu uchovanému v Rachelsee.

Jako jednoduchá metoda pro nalezení LST v sedimentech z dané lokality byla navržena kombinace ^{14}C datování, XRF skenování a měření magnetické susceptibility (MS). První metoda umožnila hrubé vymezení zájmového úseku hloubek odpovídajícího allerødu a mladšímu dryasu. Prostřednictvím XRF byly hledány peaky koncentrací niobu a fosforu, které charakterizovaly LST na Staré jímce (**rukopis II a III**). Pomocí detekce peaků MS bylo cíleno na polohy se zvýšeným obsahem částic oxidů železa (magnetit, titanomagnetit), které jsou pro tefry charakteristické (Begét a kol. 1994). Zvoleným kritériím odpovídal jediný peak objevující se současně u všech vybraných parametrů (hloubka 368 až 371 cm, vrchol v hloubce 370,7 cm). Přítomnost LST skla byla následně potvrzena na výbrusu pomocí SEM. Lze proto předpokládat, že výše uvedený postup je možné úspěšně aplikovat i u dalších jezer a zazemněných jezer v oblasti (Šumava, jižní a západní Čechy, Bavorsko), jestliže mají odpovídající stáří a povodí s podobným horninovým podložím (viz tabulka 1).

Podobně jako v případě Staré jímky (**rukopis II**), byly i u sedimentu z Rachelsee využity výbrusy obsahující polohu s LST pro charakterizaci několika desítek úlomků sopečného skla (analýza elektronovou mikrosondou) a jejich kvantifikaci (TIMA). Dle korelací získaných výsledků o chemickém složení nalezeného skla se standardy pro jednotlivé fáze LST (Riede a kol. 2011; Riede 2016) náleží nalezená kryptotefra nejspíše k fázi MLST-B (korelační koeficient 0,9999). Tatáž korelace s nejvyšším korelačním koeficientem (0,9996) byla zpětně doložena i pro LST ze Staré jímky. I tam tedy tato tefra, oproti závěrům Procházky a kol. (2019; **rukopis III**), odpovídá spíše MLST-B než MLST-A. Tyto dvě fáze jsou si nicméně charakterem tefry blízké. Navíc nelze vyloučit současnou přítomnost materiálu z obou fází naráz, jak bylo doloženo i na jiných lokalitách (Riede a kol. 2011). Získané výsledky doplňují předchozí nález na Staré jímce (Vondrák a kol. 2017; **rukopis I, II a III**) a dokládají dosud neznámý východní směr transportu LST tefry. LST nalezená v Rachelsee byla deponována 470 km vzdušnou čarou od místa erupce a tato vzdálenost tedy představuje minimální vzdálenost jejího šíření v daném směru. Je zřejmé, že přítomnost LST v kvartérních sedimentech na lokalitách situovaných východně od vulkánu otevírá nové možnosti pro uplatnění tefrochronologie v budoucích výzkumech.

V případě Rachelsee je horizont s tefrou, stejně jako u Staré jímky (**rukopis II a III**), doprovázen zvýšenou koncentrací fosforu, které by mohla být dokladem plošné eutrofizace tehdejšího životního prostředí. Již na vzorcích ze Staré jímky proto byly studovány možné dopady erupce na terestrickou vegetaci. Detailní vyhodnocení však bylo v tomto případě limitováno nízkým časovým rozlišením – jednotlivé vrstvy odpovídaly asi 40 až 60 rokům (**rukopis II**, kap. 3.2.1.). Pylová analýza byla proto provedena i na materiálu z Rachelsee, ale v rozlišení kolem 10 až 20 let na každou vrstvu. Získané výsledky se od těch ze Staré jímky nápadně liší. Pylový záznam je totiž mimořádně stabilní a žádný posun v charakteru vegetace tak zaznamenán nebyl. Doložena nebyla dokonce ani žádná reakce na předpokládané environmetální změny v době počátku mladšího dryasu. Pro budoucí výzkum se tak nabízí otázka, čím je způsobena zdokumentovaná odlišnost mezi pylovými záznamy z jižní a severní strany Šumavy. Vliv erupce Laacher See na terestrickou vegetaci je zatím prokazatelně doložen jen z lokalit situovaných v okolí do 100 km od vulkánu (Engels a kol. 2015). Zjištěné změny jsou dávány do souvislosti zejména s požáry, vyššími srážkami a nestabilitou klimatu (Birks a Lotter 1994; Baales a kol. 2002; de Klerk a kol. 2008; Engels a kol. 2015).

Poznání dopadů erupce Laacher See na tehdejší ekosystémy je důležité, jelikož šlo o rozsáhlou přírodní katastrofu, která se navíc může opakovat (Leder a kol. 2017; Hensch a kol. 2019). Přitom dosud není zřejmé, zda událost vedle ničivých účinků v nejbližším okolí (Schmincke

a kol. 1999; Baales a kol. 2002) měla krátkodobý (Robock 2000; Graf a Timmreck 2001) či dlouhodobý (Baldini a kol. 2018) vliv na tehdejší klima. Z nálezů LST v sedimentech dvou šumavských jezer jasně vyplývá, že tato tefra je pravděpodobně přítomna i v dalších sedimentech příslušného stáří, které se nacházejí na našem území, a to nejen na Šumavě. V budoucnu proto může být využita pro zpřesnění datování přírodních archivů na větším počtu lokalit. Za tímto účelem jsme navrhli a otestovali výše uvedenou metodu její detekce. Studie z posledních let navíc ukazují, že ve střední Evropě lze očekávat nálezy tefer i z islandských erupcí (např. Lane a kol. 2012; Kearney a kol. 2018). Nelze proto vyloučit, že budoucí výzkum sedimentů šumavských jezer bude moci ve větší míře využívat výhod tefrochronologie.

3.3. Přítomnost bioerozních struktur v chitinizovaných zbytcích organismů

Otázka míry zachovávání zbytků organismů v jezerních sedimentech (viz kap. 1.3.) je důležitá u veškerých paleoekologických studií, které tyto zbytky využívají. Jsou-li jsou v jezerním prostředí vhodné tafonomické podmínky, zbytky se zachovávají dobře a jejich záznam lze lépe interpretovat. Pokud tomu tak není, interpretace může být velmi obtížná. Míra zachovávání v konkrétním přírodním archivu by proto měla být vždy dopředu alespoň orientačně zhodnocena. V kvartérní paleolimnologii jsou nejčastěji využívaným typem pozůstatků živočichů jejich různé chitinizované zbytky (Smol a kol. 2001b). Své uplatnění našly i v obdobně zaměřených výzkumech na Šumavě (např. Krause-Dellin a Steinberg 1984; Schmidt a kol. 1993; Bitušík a Kubovčík 2000; Pražáková a kol. 2006; Tátošová a kol. 2006; Kletetschka a kol. 2018 – **rukopis II**, kap. 3.2.1.; Vondrák a kol. 2019b – **rukopis VI**, kap. 3.4). **Rukopis V** byl proto věnován studiu míry jejich zachovávání v sedimentech šumavských jezer. Cíleno bylo výhradně na poškození vzniklá v důsledku činnosti mikroorganismů. Této problematice byla dosud v kontextu paleolimnologie věnována minimální pozornost.

Poškození zbytků živočichů mikroorganismy jsou z vodního prostředí dobře známa zejména z měkkýších schránek a ulit (Tribolet a kol. 2008; Wisshak 2012; Tietze a Esquius 2018) či vápnitých schránek dírkonošců (Golubic a kol. 1984). Mají často podobu otvorů a chodeb (angl. microboring structures). Způsobuje je široká škála rozkladačů, především některé bakterie, sinice, řasy či houby (Golubic a kol. 2005; Tribollet a kol. 2011; Wisshak 2012; Lawfield a kol. 2014; Tietze a Esquius 2018; Thines 2018). Studie věnované stejnému fenoménu u pozůstatků sladkovodních bezobratlých živočichů tvořených převážně chitinem však zatím chybějí. Chitin je přitom považován za druhý nejběžnější biopolymer na Zemi (Kirchner 1995) a jde o stabilní látku, která může zůstat v jezerních sedimentech zachována i po miliony let (Stankiewicz a kol. 1997). Ve vodním prostředí je přesto běžně rozkládán, a to především bakteriemi, houbami a některými „houbám podobnými organismy“ (např. Myxomycetes) (Aumen 1980; Bhattacharya a kol. 2007; Swiontek Brzezinska a kol. 2008), mezi kterými tak lze očekávat i původce případných struktur představovaných právě otvory a chodbami.

Možná přítomnost stop po mikrobiální činnosti v podobě otvorů a chodeb byla pozorována na vzorcích holocénního sedimentu z jezera Laka a Prášílského jezera a na pozdně glaciálních a spodně holocénních vzorcích ze Staré jímky (obr. 1). Využity k tomu byly dvě velikostní kategorie silně chitinizovaných zbytků – trvalá vajíčka (kokony) ploštěnek ze skupiny Rhabdocoela (délka 80 až 300 μm) a čelní štítky chrostíků (délka 400 až 2000 μm) – které byly pozorovány pomocí světelné mikroskopie, skenovací elektronové mikroskopie a rentgenové mikrotomografie. Předpokládané bioerozní struktury byly nalezeny a dle morfologie rozděleny do čtyř typů, jimiž jsou jednoduché otvory, jednoduché meandrující chodby, hvězdčité chodby a abraze. Průměr otvorů a chodeb se lišil, což naznačuje větší počet jejich původců. Za původce většiny chodbám podobných struktur byly s ohledem na jejich velikost a na srovnání s výsledky dříve publikovaných studií (např. Schneider 1976; Golubic a kol. 1975, 2005) předběžně označeny houby a „houbám podobné organismy“. U jednoduchých otvorů a abraze jsou původci zatím nejasní.

Pozitivní nálezy alespoň jedné ze čtyř struktur byly doloženy jen u ~10 % chitinizovaných zbytků. Ačkoliv mohla být některá poškození přehlédnuta, lze považovat zachování daného typu mikrofosilií v sedimentech šumavských jezer za velmi dobré. Hypotézu 3 se proto nepodařilo potvrdit. Dobré zachování je pravděpodobně důsledkem deficitu kyslíku či anoxie těsně nad povrchem jezerního dna, které tlumí intenzitu mikrobiálního rozkladu (Canfield 1994; Keil a kol. 1994; Gaines a kol. 2005). Takové podmínky byly pozorovány u dna většiny šumavských jezer (Vrba a kol. 2000; Kopáček a kol. 2004). Výjimkou je mělké jezero Laka (Vrba a kol. 2000), u kterého lze předpokládat intenzivnější míchání vodního sloupce. Zde však absence anoxie nade dnem může být kompenzována vysokou sedimentační rychlostí (Švambers 1914b; Kuneš P. a kol., nepublikováno). Celkově se sedimenty šumavských jezer jeví jako vhodné pro kvantitativní studium chitinizovaných zbytků vodních bezobratlých.

3.4. Doklady přirozené dystrofie Prášílského jezera

Závěrečný rukopis disertace (**rukopis VI**) je věnován otázce stavu šumavských jezer v době před počátkem jejich antropogenní acidifikace a zároveň před obdobím, kdy v nich byla uměle ovlivňována rybí obsádka a výška hladiny (např. Švambers 1914a, b; Veselý 1994). Znalost tohoto přirozeného (referenčního) stavu je důležitá pro posouzení změn na těchto chráněných lokalitách v současnosti probíhajících (Vrba a kol. 2015, 2016). Nástrojem, který jej umožnil rekonstruovat, byla v prezentovaném případě analýza zbytků chrostíků (Insecta: Trichoptera) dochovaných v jezerním sedimentu. Navzdory jejímu potenciálu pro paleoenvironmentální studie (Williams 1988) byla tato metoda dosud využívána velmi málo, a to téměř výhradně u říčních sedimentů (např. Greenwood a kol. 2003, 2006; Howard a kol. 2009). S výjimkou jediné studie provedené na sedimentech jezera Kråkenes (Solem a Birks 2000), klasické lokality paleolimnologického výzkumu nacházející se v jihozápadním Norsku, nebyla dosud v Evropě plně uplatněna u sedimentů limnických.

Za modelovou lokalitu bylo zvoleno Prášílské jezero (obr. 1). To sice nepatřilo mezi šumavská jezera ve 20. stol. nejsilněji postižená acidifikací (Kopáček a kol. 1999; Kohout a Fott 2006), ale přesto je pro podobný výzkum velmi vhodné. V první řadě je v něm jeho fauna chrostíků dlouhodobě monitorována (Soldán a kol. 2012) a předpokládá se, že jeho odtok nikdy neumožňoval přirozené osídlení rybami (Vrba a kol. 2000), které by mohly při změnách velikosti své populace ovlivňovat charakter ekosystému. V druhé řadě má Prášílské jezero výhodu malé velikosti (tabulka 1), která je dobrým předpokladem pro transport zbytků chrostíků, kteří jsou převážně litorální (Soldán a kol. 2012), až do středu jezerní pánve, kde byl odebrán studovaný vrt (délka 2,2 m). Ve stejném vrtu bylo navíc doloženo dobré zachování zbytků larev chrostíků (**rukopis V**, kap. 3.4.).

Ve vzorcích sedimentu bylo identifikováno 10 taxonů chrostíků. Kromě druhu *Athripsodes aterrimus* jsou všechny známy ze současných šumavských jezer (Soldán a kol. 2012). O všech zároveň platí, že jde o taxony preferující nebo tolerující kyselé vody. Dle ¹⁴C datování byla stejná fauna přítomna i v nejstarší části záznamu odpovídající spodnímu holocénu. Tehdejšími dominantami byly morfo-taxony *Limnephilus coenosus*-type a *L. rhombicus*-type, které doplňoval druh *Holocentropus dubius*. Jde o běžnou faunu dystrofních horských jezer s přítomností vodní vegetace v litorálu (např. Chvojka 1992; Waringer a Graf 2011). Získané výsledky jsou proto v souladu s hypotézami 4A i 4B.

Prášílské jezero se tedy stalo jezerem dystrofním krátce po svém vzniku v době kolem samého počátku holocénu. Pokud však interpretujeme jeho dystrofii jako důsledek paludifikace a přirozené acidifikace probíhající ve vysokých polohách Šumavy současně, dojdeme k závěru, že stejné procesy s velkou pravděpodobností probíhaly i v povodích ostatních jezer. Za těchto předpokladů tak k iniciaci přirozené acidifikace došlo na Šumavě nejpozději na hranici mladší dryas–holocén (~11650 cal. yr. BP) či krátce po ní. Spouštěčem pravděpodobně byly tehdejší klimatické

změny (např. Rasmussen a kol. 2014), které zde vedly ke vzniku zapojeného lesa a lesních půd (Carter a kol. 2018a, b). Tyto interpretace jsou konzistentní se závěry Jankovské (2006), Pražákové a kol. (2006) a Kopáčka a kol. (2009), kteří studovali sedimenty Plešného jezera. Ti spojují počátek holocénu se snížením eroze v důsledku zalesnění povodí, s navýšením exportu organických kyselin a organicky vázaného hliníku z nově vzniklých lesních půd do jezera a též se změnou druhového složení perlooček indikující pokles pH. Přesto by bylo vhodné v budoucnu analýzu zbytků chrostíků zopakovat na některém z pozdně glaciálních sedimentárních záznamů z šumavských jezer (viz **rukopis I**, kap. 3.1.) a ověřit tak, že jezera před počátkem holocénu hostila taxony chrostíků s odlišnými ekologickými nároky.

Holocénní sukcese chrostíků v Prášílském jezeře potvrzuje, že subfossilní zbytky této bentické skupiny hmyzu lze úspěšně využít jako proxy v paleoekologicky orientovaných studiích. V případě šumavských jezer není pravděpodobné, že během dalších fází zotavování z antropogenní acidifikace dojde k zásadní přestavbě druhového spektra chrostíků. Druhy dystrofních jezer pravděpodobně přežívají období antropogenní acidifikace relativně dobře, a proto je současná fauna podobná fauně původní.

4. Závěry

Šumavská jezera jsou různě stará, jelikož počátek akumulace jejich sedimentů se časově liší. Na většině dosud studovaných lokalit je přítomna pozdně glaciální fáze jezerní sedimentace, která nabývá mocnosti i několika metrů. Tato fáze chybí v Prášílském jezeře. Nejstarší sedimenty šumavských jezer přesahují stáří 14000 cal. yr. BP a dosahují stáří minimálně kolem 14700 cal. yr. BP. Tato situace byla doložena i na lokalitě Stará jímka, což je v rozporu s představou o existenci lokálního zalednění karů v údolí Prášílského jezera ještě ve starším dryasu.

V sedimentech bývalého jezera Stará jímka se dále podařilo doložit přítomnost tefry Laacher See, která pochází ze střední fáze (MLST) erupce stejnojmenného vulkánů. Táž tefra byla identifikována i na bavorské (tj. jižní) straně Šumavy v Rachelsee. Jde o první nálezy dané tefry v Českém masivu, které jasně ukazují, že sopečný materiál se atmosférickou cestou po Evropě šířil i východním směrem. Lze předpokládat, že se tefra Laacher See vyskytuje nejen v dalších jezerech na Šumavě, ale i v širším regionu. Díky tomu může být využívána jako chronostratigrafický marker, který pomůže při budoucích výzkumech zpřesnit datování kvartérních sedimentů odpovídajícího stáří. Doložena byla rovněž přítomnost horizontu obsahujícího mikroskopické sférické objekty (MSP) vzniklé tavením při vysoké teplotě. Povaha těchto objektů a jejich stáří (vypočteno na 12755±92 cal. yr. BP) se shodují s nálezy ve YDB horizontech známých z několika kontinentů, které bývají interpretovány jako doklad impaktu na počátku mladšího dryasu. I u tohoto horizontu tak nelze vyloučit budoucí využití při datování sedimentů, a to zejména v případě výzkumů, které budou geograficky přesahovat oblast rozšíření tefry Laacher See.

U obou časově blízkých událostí byl očekáván potenciální dopad na vodní i terestrické ekosystémy. Prvotní výsledky analýzy zbytků pakomárovitých (Insecta: Chironomidae), perlooček (Crustacea: Cladocera) a vybraných zástupců sladkovodních řas (Chlorophyta, Chrysophyta) na materiálu ze Staré jímky ukázaly zjevnou odezvu ve vodním prostředí. Výsledky pylové analýzy, která byla provedena i u sedimentů z Rachelsee, jsou však protichůdné a ukazují na možné odlišnosti vývoje tehdejší terestrické vegetace na jihozápadních a severovýchodních svazích Šumavy. Záznam ze Staré jímky je kolem počátku mladšího dryasu charakterizován nápadným úbytkem v relativním zastoupení břízy (*Betula*), kolísáním borovice (*Pinus silvestris/mugo*) a nárůstem podílu lipnicovitých (Poaceae) a dalších prvků otevřené krajiny. Tyto změny ukazují na zhoršení podmínek pro lesní druhy. Pylový záznam z Rachelsee je oproti tomu stabilní. Pro zobecnění pozorovaných změn a odlišení případných reakcí na obě události je tak třeba další, podrobnější výzkum.

Vzorky sedimentu z Prášílského jezera, Staré jímky a jezera Laka byly využity pro studium míry poškození chitinizovaných zbytků vodních živočichů bioerozí. Identifikovány byly čtyři typy bioerozních struktur – jednoduché otvory, jednoduché meandrující chodby, hvězdčité chodby a abraze. Zjevné poškození studovaných mikrofosilií bylo pozorováno přibližně u 10 % případů. Tento podíl naznačuje relativně dobré podmínky pro zachování, které jsou pravděpodobně spojeny v přítomnosti anoxie u dna jezer či s vysokou sedimentační rychlostí. V obecně rovině však postupná degradace a úplné rozložení části zbytků organismů mohou mít negativní vliv na reprezentativnost záznamů. Kvalita zachování by proto měla být v paleolimnologických studiích běžně uváděna.

Na příkladu záznamu z Prášílského jezera byla doložena kontinuita výskytu fauny chrostíků tolerujících nízké pH. Taxony u jezeře přítomné ve spodním holocénu jsou známy i ze současných šumavských jezer. Dominující *Limnophilus coenosus*-type indikuje dystrofní podmínky. Přirozená acidifikace v oblasti proto začala nejpozději s nástupem holocénu. Při odhadu vývoje současného zotavování šumavských jezer z antropogenní acidifikace je proto třeba počítat s limity vyplývajících z jejich původního dystrofního charakteru. U chrostíků lze proto očekávat spíše změny na úrovni relativního zastoupení stávajících druhů než v podobě osídlení druhy acidosenzitivními, které se nyní v jezerech nevyskytují.

5. Seznam citované literatury:

Citace jsou v seznamu řazeny výhradně abecedně. U prací s více než dvaceti členy autorského kolektivu je citace zkrácena. Práce, u kterých je D. Vondrák členem autorského kolektivu, jsou označeny symbolem „*“. Práce, které jsou součástí předkládané disertace, jsou označeny symbolem „**“.

Ammann B., van Leeuwen J. F. N., van der Knaap W. O., Lischke H., Heiri O., Tinner W. (2013): Vegetation responses to rapid warming and to minor climatic fluctuations during the Late-Glacial Interstadial (GI-1) at Gerzensee (Switzerland). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 391: 40–59. DOI: 10.1016/j.palaeo.2012.07.010

Andrén C. M., Rydin E. (2012): Toxicity of inorganic aluminium at spring snowmelt—In-stream bioassays with brown trout (*Salmo trutta* L.). *Science of the Total Environment* 437: 422–432. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.08.006

Appleby P. G. (1998): Dating recent sediments by ²¹⁰Pb: Problems and solutions: 7–24. In: Ilus E. (ed.): *Dating of sediments and determination rate STUK-A145*, Finland Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK), Helsinki: 151 s.

Appleby P. G., Oldfield F. (1978): The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported ²¹⁰Pb to the sediment. *Catena* 5: 1–8. DOI: 10.1016/S0341-8162(78)80002-2

Aumen N. G. (1980): Microbial Succession on a Chitinous Substrate in a Woodland Stream. *Microbial Ecology* 6(4): 317–327. DOI: 10.1007/BF02010494

Baales M., Jöris O., Street M., Bittmann F., Weniger B., Wiethold J. (2002): Impact of the Late Glacial Eruption of the Laacher See Volcano, Central Rhineland, Germany. *Quaternary Research* 58: 273–288. DOI: 10.1006/qres.2002.2379

Babůrek J., Adamová M., Břízová E., Havlíček P., Hrazdíra P., Krupička J., Mentlík P., Petáková Z., Skácelová D., Šrámek J., Žáček V., Verner K., Lysenko V., Žák J. (2006): *Vysvětlivky k základní geologické mapě České republiky 1:25.000*, list 22-333 Srní. Česká geologická služba, Praha: 75 s.

Baldini J. U. L., Brown R. J., Mawdsley N. (2018): Evaluating the link between the sulfur-rich Laacher See volcanic eruption and the Younger Dryas climate anomaly. *Climate of the Past* 14: 969–990. DOI: 10.5194/cp-14-969-2018

Baron J. S., Rueth H. M., Wolfe A. M., Nydick K. R., Allstott E. J., Minear J. T., Moraska B. (2000): Ecosystem Responses to Nitrogen Deposition in the Colorado Front Range. *Ecosystems* 3: 352–368. DOI: 10.1007/s100210000032

Bayerberger F. (1886): *Geographisch-geologische Studien aus dem Böhmerwalde. Die Spuren alter Gletcher, die Seen und Thäler des Böhmerwaldes. Ergänzungsheft 81 („Petermanns Mittheilungen“)*, Justus Perthes, Gotha: 63 s.

Beamish R. J. (1976): Acidification of lakes in Canada by acid precipitation and the resulting effects on fishes. *Water, Air, and Soil Pollution* 6: 501–514. DOI: 10.1007/BF00182888

Begét J. E., Stihler S. D., Stone D. B. (1994): A 500-year-long record of tephra falls from Redoubt Volcano and other volcanoes in upper Cook Inlet, Alaska. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 62: 55–67. DOI: 10.1016/0377-0273(94)90028-0

Bergström A.-K., Jansson M. (2006): Atmospheric nitrogen deposition has caused nitrogen enrichment and eutrophication of lakes in the northern hemisphere. *Global Change Biology* 12: 635–643. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2006.01129.x

- Bhattacharya D., Nagpure A., Gupta R. K. (2007): Bacterial Chitinases: Properties and Potential. *Critical Reviews in Biotechnology* 27: 21–28. DOI: 10.1080/07388550601168223
- Birks H. H., Battarbee R. W., Birks H. J. B. (2000): The development of the aquatic ecosystem at Kråkenes Lake, western Norway, during the late-glacial and early-Holocene – a synthesis. *Journal of Paleolimnology* 23: 91–114. DOI: 10.1023/A:1008079725596
- Birks H. J. B., Lotter A. F. (1994): The impact of the Laacher See Volcano (11000 yr B.P.) on terrestrial vegetation and diatoms. *Journal of Paleolimnology* 11: 313–322. DOI: 10.1002/jqs.3390080307
- Bitušík P., Kubovčík V. (2000): Sub-fossil chironomid assemblages (Diptera: Chironomidae) from the Černé lake and Prášílské lake (Bohemian Forest, Czech Republic). *Silva Gabreta* 4: 253–258.
- Bobbink R., Hornung M., Roelofs J. G. M. (1998): The effects of air-borne nitrogen pollutants on species diversity in natural and semi-natural European vegetation. *Journal of Ecology* 86: 717–738. DOI: 10.1046/j.1365-2745.1998.8650717.x
- Boslough M., Nicoll K., Holliday V., Daulton T. L., Meltzer D., Pinter N., Scott A. C., Surovell T., Claeys P., Gill J., Paquay F., Marlon J., Bartlein P., Whitlock C., Grayson D., Jull A. J. T. (2012): Arguments and Evidence Against a Younger Dryas Impact Event. *Geophysical Monograph Series* 198: 13–26. DOI: 10.1029/2012GM001209
- Boyle J. F. (2007): Loss of apatite caused irreversible early-Holocene lake acidification. *Holocene* 17(4): 543–547. DOI: 10.1177/0959683607077046
- Boyle J. F., Chiverrell R. Ch., Plater A., Thrasher I., Bradshaw E., Birks H., Birks J. (2013): Soil mineral depletion drives early Holocene lake acidification. *Geology* 41: 415–418. DOI: 10.1130/G33907.1
- Braukmann U., Biss R. (2004): Conceptual study – An improved method to assess acidification in German streams by using benthic macroinvertebrates. *Limnologica* 34: 433–450. DOI: 10.1016/S0075-9511(04)80011-2
- Bronk Ransey Ch., Albert P. G., Blockley S. P. E., Hardiman M., Housley R. A., Lane Ch. S., Lee S., Matthews I. P., Smith V. C., Lowe J. J. (2015): Improved age estimates for key Late Quaternary European tephra horizons in the RESET lattice. *Quaternary Science Reviews* 118: 18–32. DOI: 10.1016/j.quascirev.2014.11.007
- Books S. J., Langdon P. G., Heiri O. (2007): The identification and use of Palaeoarctic Chironomidae larvae in palaeoecology. Technical guide no. 10. Quaternary Research Association, London: 276 p.
- Brůna J., Wild J., Svoboda M., Heurich M., Müllerová J. (2013): Impacts and underlying factors of landscape-scale, historical disturbance of mountain forest identified using archival documents. *Forest Ecology and Management* 305: 294–306. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.06.017
- Břízová E. (1996): Palynological research in the Šumava Mountains. *Silva Gabreta* 1: 109–113.
- Bunch T. E., Hermes R. E., Moore A. M. T., Kennett D. J., Weaver J. C., Wittke J. H., DeCarli P. S., Bischoff J. L., Hillman G. C., Howard G. A., Kimbel D. R., Kletetschka G., Lipo C. P., Sakai S., Revay Z., West A., Firestone R. B., Kennett J. P. (2012): Very high-temperature impact melt products as evidence for cosmic airbursts and impacts 12,900 years ago. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109(28): E1903–E1912. DOI: 10.1073/pnas.1204453109
- Canfield D. E. (1994): Factors influencing organic carbon preservation in marine sediments. *Chemical Geology* 114: 315–329. DOI: 10.1016/0009-2541(94)90061-2
- Carter C. E. (2001): On the use of instar information in the analysis of subfossil chironomid data. *Journal of Paleolimnology* 25: 493–501. DOI: 10.1023/A:1011135503331
- Carter V. A., Chiverrell R. Ch., Clear J. L., Kuosmanen N., Moravcová A., Svoboda M., Svobodová- Svitavská H., van Leeuwen J. F. N., van der Knaap W. O., Kuneš P. (2018a): Quantitative palynology informing conservation ecology in the Bohemian/Bavarian forest of central Europe. *Frontiers in Plant Science* 8: článek č. 2268. DOI: 10.3389/fpls.2017.02268

- Carter V. A., Moravcová A., Chiverrell R. Ch., Clear J. L., Finsinger W., Dreslerová D., Halsall K., Kuneš P. (2018b): Holocene-scale fire dynamics of central European temperate spruce–beech forests. *Quaternary Science Reviews* 191: 15–30. DOI: 10.1016/j.quascirev.2018.05.001
- Clair T.A., Dennis I. F., Scruton D. A., Gillis M. (2007): Freshwater acidification research in Atlantic Canada: a review of results and predictions for the future. *Environmental Reviews* 15: 153–167. DOI: 10.1139/A07-004
- Čtvrtlíková M., Vrba J., Znachor P., Hekera P. (2009): Effects of aluminium toxicity and low pH on the early development of *Isoëtes echinospora*. *Preslia* 81: 135–149.
- Davies S. M. (2015): Cryptotephra: the revolution in correlation and precision dating. *Journal of Quaternary Science* 30(2): 114–130. DOI: 10.1002/jqs.2766
- Davies S. M., Branch N. P., Lowe J. J., Turney Ch. S. M. (2002): Towards a European tephrochronological framework for Termination 1 and the Early Holocene. *Philosophical transactions of the Royal Society of London, Series A* 360: 767–802. DOI: 10.1098/rsta.2001.0964
- de Klerk P., Janke W., Kühn P., Theuerkauf M. (2008): Environmental impact of the Laacher See eruption at a large distance from the volcano: Integrated palaeoecological studies from Vorpommern (NE Germany). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 270(1–2): 196–214. DOI: 10.1016/j.palaeo.2008.09.013
- de la Riva-Caballero A., Birks H. J. B., Björne A. E., Birks H. H., Solhøy T. (2010): Oribatid mite assemblages across the tree-line in western Norway and their representation in lake sediments. *Journal of Paleolimnology* 44: 361–374 DOI: 10.1007/s10933-010-9411-y
- Elias S. A. (2010): *Advances in Quaternary Entomology*. Elsevier, Amsterdam: 288 s.
- Engel Z., Braucher R., Traczyk A., Léanni L., ASTER Team (2014): ^{10}Be exposure age chronology of the last glaciation in the Krkonoše Mountains, Central Europe. *Geomorphology* 206: 107–121. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.10.003
- Engel Z., Mentlík P., Braucher R., Křížek M., Pluháčková M., ASTER Team (2017): ^{10}Be exposure age chronology of the last glaciation of the Roháčská Valley in the Western Tatra Mountains, central Europe. *Geomorphology* 293: 130–142. DOI: 10.1016/j.geomorph.2017.05.012
- Engel Z., Mentlík P., Braucher R., Minár J., Laetitia L., ASTER Team (2015): Geomorphological evidence and ^{10}Be exposure ages for the Last Glacial Maximum and deglaciation of the Velká and Malá Studená dolina valleys in the High Tatra Mountains, central Europe. *Quaternary Science Reviews* 124: 106–123. DOI: 10.1016/j.quascirev.2015.07.015
- Engels S., van Geel B., Buddelmeijer N., Brauer A. (2015): High-resolution palynological evidence for vegetation response to the Laacher See eruption from the varved record of Meerfelder Maar (Germany) and other central European records. *Review of Palaeobotany and Palynology* 221: 160–170. DOI: 10.1016/j.revpalbo.2015.06.010
- Engstrom D. R., Fritz S. C., Almendinger J. E., Juggins S. (2000): Chemical and biological trends during lake evolution in recently deglaciated terrain. *Nature* 408: 161–166. DOI: 10.1038/35041500
- Ergenzinger P. (1967): Die eiszeitliche Vergletscherung des Bayerischen Waldes. *Eiszeitalter und Gegenwart* 18: 152–168.
- Exley C., Chappel J. S., Birchall J. D. (1991): A Mechanism for Acute Aluminium Toxicity in Fish. *Journal of Theoretical Biology* 151(3): 417–428. DOI: 10.1016/S0022-5193(05)80389-3
- Facher E., Schmidt R. (1996): Application of chrysophyte sediment trap and a cyst-based pH transfer function to annually laminated sediments (Lake Plešné, Bohemia, Czech Republic). *Nova Hedwigia* 114: 219–231.
- Faustová M., Sacherová V., Svensson J.-E., Taylor D. J. (2011): Radiation of European Eubosmina (Cladocera) from *Bosmina* (*E.*) *longispina*—concordance of multipopulation molecular data with paleolimnology. *Limnology and Oceanography* 56(2): 440–450. DOI: 10.4319/lo.2011.56.2.0440

- Firestone R. B., West A., Kennett J. P. a kol. (2007): Evidence for an extraterrestrial impact 12,900 years ago that contributed to the megafaunal extinctions and the Younger Dryas cooling. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104(41): 16016–16021. DOI: 10.1073/pnas.0706977104
- Fjellheim A., Raddum G. G. (1990): Acid precipitation: Biological monitoring of streams and lakes. *Science of the Total Environment* 96: 57–66. DOI: 10.1016/0048-9697(90)90006-G
- Flower R. J. (1993): Diatom preservation: experiments and observations on dissolution and breakage in modern and fossil material. *Hydrobiologia* 269/270: 473–484. DOI: 10.1007/978-94-017-3622-0_48
- Fott J., Pražáková M., Stuchlík E., Stuchlíková Z. (1994): Acidification of lakes in Šumava (Bohemia) and in the High Tatra Mountains (Slovakia). *Hydrobiologia* 274: 37–47. DOI: 10.1007/BF00014625
- Frič A., Vávra V. (1898): Výzkumy zvířeny ve vodách českých III. Výzkum dvou jezer šumavských, Černého a Čertova jezera. *Archiv pro přírodovědecký výzkum Čech* 10(3): 1–69.
- Fuchs M., Owen L. A. (2008): Luminescence dating of glacial and associated sediments: review, recommendations and future directions. *Boreas* 37: 636–659. DOI: 10.1111/j.1502-3885.2008.00052.x
- Gaines R. R., Kennedy M. J., Droser M. L. (2005): A new hypothesis for organic preservation of Burgess Shale taxa in the middle Cambrian Wheeler Formation, House Range, Utah. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 220: 193–205. DOI: 10.1016/j.palaeo.2004.07.034
- Golubic S., Campbell S. E., Drobne K., Cameron B., Balsam W. L., Cimerman F., Dubois L. (1984): Microbial endoliths: a benthic overprint in the sedimentary record, and a paleobathymetric cross-reference with foraminifera: *Journal of Paleontology* 58: 351–361.
- Golubic S., Perkins R. D., Lukas K. J. (1975): Boring microorganisms and microborings in carbonate substrates: 229–259 In: Frey R. W. (ed.): *The Study of Trace Fossils*. Springer, Berlin, Heidelberg: 562. s. DOI: 10.1007/978-3-642-65923-2_12.
- Golubic S., Radtke G., Le Campion-Alsumard T. (2005): Endolithic fungi in marine ecosystems. *Trends in Microbiology* 13: 229–235. DOI: 10.1016/j.tim.2005.03.007
- Graf H.-F., Timmreck C. (2001): A general climate model simulation of the aerosol radiative effects of the Laacher See eruption (10,900 B.C.). *Journal of Geophysical Research* 106(D14): 14747–14756. DOI: 10.1029/2001JD900152
- Greenwood M. T., Agnew M. D., Wood P. J. (2003): The use of caddisfly fauna (Insecta: Trichoptera) to characterise the Late-glacial River Trent, England. *Journal of Quaternary Science* 18: 645–661. DOI: 10.1002/jqs.786
- Greenwood M. T., Wood P. J., Monk W. A. (2006): The use of fossil caddisfly assemblages in the reconstruction of flow environments from floodplain paleochannels of the River Trent, England. *Journal of Paleolimnology* 35: 747–761. DOI: 10.1007/s10933-005-5162-6
- Hagstrum J. T., Firestone R. B., West A., Weaver J. C., Bunch T. E. (2017): Impact-related microspherules in Late Pleistocene Alaskan and Yukon “muck” deposits signify recurrent episodes of catastrophic emplacement. *Scientific Reports* 7: článek 16620. DOI: 10.1038/s41598-017-16958-2
- Hajdas I., Ivy-Ochs S. D., Bonani G., Lotter A. F., Zolitschka B., Schlüchter Ch. (1995): Radiocarbon age of the Laacher See tephra: 11,230 ± 40 BP. *Radiocarbon* 37(2): 149–154. DOI: 10.1017/S0033822200030587
- Hauner U. (1980): Untersuchungen zur klimagesteuerten tertiären und quartären Morphogenese des Inneren Bayerischen Waldes (Rachel-Lusen) unter besonderer Berücksichtigung pleistozän kaltzeitlicher Formen und Ablagerungen. Institut für Geographie an der Universität Regensburg, Selbstverlag, Regensburg: 198 s.

- Haynes C. V. Jr. (2008): Younger Dryas "black mats" and the Rancholabrean termination in North America. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105(18): 6520–6525. DOI: 10.1073/pnas.0800560105
- Heggen M. P., Birks H. H., Heiri O., Grytnes J.-A., Birks H. J. B. (2012): Are fossil assemblages in a single sediment core from a small lake representative of total deposition of mite, chironomid, and plant macrofossil remains? *Journal of Paleolimnology* 48: 669–691. DOI: 10.1007/s10933-012-9637-y
- Heiri O. (2004): Within-lake variability of subfossil chironomid assemblages in shallow Norwegian lakes. *Journal of Paleolimnology* 32: 67–84. DOI: 10.1023/B:JOPL.0000025289.30038.e9
- Heiri O., Brooks S. J., Birks H. J. B., Lotter A. F. (2011): A 274-lake calibration data-set and inference model for chironomid-based summer air temperature reconstruction in Europe. *Quaternary Science Reviews* 30: 3445–3456. DOI: 10.1016/j.quascirev.2011.09.006
- Hellich B. (1878): Perloočky země České (Cladocera). *Archiv pro přírodovědecké proskoumání Čech* 3, oddělení IV., sešit 2: 1–130.
- Hensch M., Dahm T., Ritter J., Heimann S., Schmidt B., Stange S., Lehman K. (2019): Deep low-frequency earthquakes reveal ongoing magmatic recharge beneath Laacher See Volcano (Eifel, Germany). *Geophysical Journal International* 216: 2025–2036. DOI: 10.1093/gji/ggy532
- Holliday V.T. (2016): Problematic dating of claimed Younger Dryas boundary impact proxies. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112(49): E6721.
- Holliday V., Surovell T., Johnson E. (2015): A Blind Test of the Younger Dryas Impact Hypothesis. *Plos One* 11(7): článek e0155470. DOI: 10.1371/journal.pone.0155470
- Hořícká Z., Stuchlík E., Hudec I., Černý M., Fott J. (2006): Acidification and the structure of crustacean zooplankton in mountain lakes: The Tatra Mountains (Slovakia, Poland). *Biologia* 61(Suppl. 18): S121–S134. DOI: 10.2478/s11756-006-0125-6
- Hošek J., Pokorný P., Kubovčík V., Horáček I., Žáčková P., Kadlec J., Rojik F., Lisá L., Bučkuliaková S. (2014): Late glacial climatic and environmental changes in eastern-central Europe: Correlation of multiple biotic and abiotic proxies from the Lake Švarcenberk, Czech Republic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 396: 155–172. DOI: 10.1016/j.palaeo.2013.12.024
- Hošek J., Pokorný P., Prach J., Šída P., Křížek M. (2018): Fossilní termokras v jižních Čechách / Fossil thermokarst in South Bohemia (Czech Republic). *Geoscience Research Reports* 51(2): 157–164. DOI: 10.3140/zpravy.geol.2018.27
- Hošek J., Prach J., Křížek M., Šída P., Moska P., Pokorný P. (2019, in press): Buried Late Weichselian thermokarst landscape discovered in the Czech Republic, central Europe. *Boreas*. DOI: 10.1111/bor.12404
- *Hošek J., Prach J., Šída P., Houfková P., Vondrák D., Lisá L., Pokorný P., Chvojka O., Dohnal J. (2016): Sedimentární vývoj pozdně glaciálních jezer u Veselí nad Lužnicí / Sedimentary development of the Late Glacial lakes near Veselí nad Lužnicí. *Geoscience Research Reports* 49: 131–139. DOI: 10.3140/zpravy.geol.2016.40
- Howard L. C., Wood P. J., Greenwood M. T., Rendell H. M. (2009): Reconstructing riverine paleo-flow regimes using subfossil insects (Coleoptera and Trichoptera): the application of the LIFE methodology to paleochannel sediments. *Journal of Paleolimnology* 42: 453–466. DOI: 10.1007/s10933-008-9298-z
- Chlupáč I., Brzobohatý R., Kovanda J., Stráník Z. (2002): *Geologická minulost české republiky*. Academia, Praha: 436 s.
- Chvojka P. (1992): Chrostíci (Trichoptera, Insecta) Tatranského národného parku. *Zborník prác o Tatranskom národnom parku* 32: 165–195.

- Israde-Alcántara I., Bischoff J., Domínguez-Vázquez G., Li H.-Ch., DeCarli P.S., Bunch T. E., Wittke J. H., Weaver J.C., Firestone R. B., West A., Kennett J. P., Mercer Ch., Xie S., Richman E. K., Kinzie Ch. R., Wolbach W. S. (2012): Evidence from central Mexico supporting the Younger Dryas extraterrestrial impact hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109(13): E738–E747. DOI: 10.1073/pnas.1110614109
- Israde-Alcántara I., Domínguez-Vázquez G., Gonzalez S., Bischoff J., West A., Huddart D. (2018): Five Younger Dryas black mats in Mexico and their stratigraphic and paleoenvironmental context: *Journal of Paleolimnology* 59(1): 59–79. DOI: 10.1007/s10933-017-9982-y
- Ivy-Osch S., Kerschner H., Reuther A., Preusser F., Heine K., Maisch M., Kubik P. W., Schlüchter C. (2008): Chronology of the last glacial cycle in the European Alps. *Journal of Quaternary Science* 23(6–7): 559–573. DOI: 10.1002/jqs.1202
- Jankovská V. (2006): Late Glacial and Holocene history of Plešné Lake and its surrounding landscape based on pollen and palaeoalgalogical analyses. *Biologia* 61(Suppl. 20): S371–S385. DOI: 10.2478/s11756-007-0064-x
- Jensen B. J. L., Pyne-O'Donnell S., Plunkett G., Froese D. G., Hughes P. D. M., Sigl M., McConnell J. R., Amesbury M. J., Blackwell P. G., van den Bogaard Ch., Buck C. E., Charman D. J., Clague J. J., Hall V. A., Koch J., Mackay H., Mallon G., McColl L., Pilcher J. R. (2014): Transatlantic distribution of the Alaskan White River Ash. *Geology* 42 (10): 875–878. DOI: 10.1130/G35945.1
- Kadlec J., Hercman H., Žák K., Nowicki T. (2000): Late Glacial and Holocene Climatic Record in a Stalagmite from the Holštejnská Cave (Moravian Karst, Czech Republic). *Geolines* 11: 174–176.
- Kadlubowska J. Z., Michler G. (1989): Palökologische Untersuchungen an Sedimentkernen aus dem Rachelsee. *Berichte der Bayerischen Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege* 13: 230–260.
- Kearney R., Albert P. G., Staff R. A., Pál I., Veres D., Magyari E., Bronk Ramsey Ch. (2018): Ultra-distal fine ash occurrences of the Icelandic Askja-S Plinian eruption deposits in Southern Carpathian lakes: New age constraints on a continental scale tephrostratigraphic marker. *Quaternary Science Reviews* 188: 174–182. DOI: 10.1016/j.quascirev.2018.03.035
- Keil R. G., Hu F. S., Tsamakis E. C., Hedges J. I. (1994): Pollen in marine-sediments as an indicator of oxidation of organic-matter. *Nature* 369(6482): 639–641. DOI: 10.1038/369639a0
- Kennett J. P., Kennett D. J., Culleton B. J. a kol. (2015): Bayesian chronological analyses consistent with synchronous age of 12,835–12,735 Cal B.P. for Younger Dryas boundary on four continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 112(32): E4344–E4353. DOI: 10.1073/pnas.1507146112
- Kirchner M. (1995): Microbial colonization of copepod body surfaces and chitin degradation in the sea: *Helgoländer Meeresunters* 49: 201–212. doi: 10.1007/BF02368350
- Kjær K. H., Larsen N. K., Binder T. a kol. (2018): A large impact crater beneath Hiawatha Glacier in northwest Greenland. *Science Advances* 4(11): článek eaar8173. DOI: 10.1126/sciadv.aar8173
- **Kletetschka G., Vondrák D., Hrubá J., Procházka V., Nábělek L., Svitavská-Svobodová H., Bobek P., Hořická Z., Kadlec J., Takáč M., Stuchlík E. (2018): Cosmic-Impact Event in Lake Sediments from Central Europe Postdates the Laacher See Eruption and Marks Onset of the Younger Dryas. *The Journal of Geology* 126(6): 561–575. DOI: 10.1086/699869
- **Kletetschka G., Vondrák D., Hrubá J., van der Knaap W. O., Van Leeuwen J. F. N., Heurich M. (2019): Laacher See tephra discovered in Bohemian Forest, Germany, east of the eruption. *Quaternary Geochronology* (51): 130–139. DOI: 10.1016/j.quageo.2019.02.003

- Kohout L., Fott J. (2006): Restoration of zooplankton in a small acidified mountain lake (Plešné Lake, Bohemian Forest) by reintroduction of key species. *Biologia, Bratislava* 61(Suppl. 20): S477–S483. DOI: 10.2478/s11756-007-0065-9
- Kopáček J., Brzáková M., Hejzlar J., Nedoma J., Porcal P., Vrba J. (2004): Nutrient cycling in a strongly acidified mesotrophic lake. *Limnology and Oceanography* 49(4): 1202–1213. DOI: 10.4319/lo.2004.49.4.1202
- Kopáček J., Hejzlar J., Kaňa J., Norton S. A., Porcal P., Turek J. (2009): Trends in aluminium export from a mountainous area to surface waters, from deglaciation to the recent: Effects of vegetation and soil development, atmospheric acidification, and nitrogen-saturation. *Journal of Inorganic Biochemistry* 103: 1439–1448. DOI: 10.1016/j.jinorgbio.2009.07.019
- Kopáček J., Hejzlar J., Porcal P., Nedoma J. (1999): Chemistry of Prášilské Lake and its tributaries during the 1998 summer temperature stratification. *Silva Gabreta* 3: 33–48.
- Kopáček J., Procházková L., Stuchlík E., Blažka P. (1995): The nitrogen-phosphorus relationship in mountain lakes: Influence of atmospheric input, watershed, and pH. *Limnology and Oceanography* 40(5): 930–937. DOI: 10.4319/lo.1995.40.5.0930
- Kopáček J., Stuchlík E. (1994): Chemical characteristics of lakes in the High Tatra Mountains, Slovakia. *Hydrobiologia* 274: 49–56. DOI: 10.1007/BF00014626
- Kopáček J., Ulrich K.-U., Hejzlar J., Borovec J., Stuchlík E. (2001a): Natural inactivation of phosphorus by aluminum in atmospherically acidified water bodies. *Water Research* 35(16): 3783–3790. DOI: 10.1016/S0043-1354(01)00112-9
- Kopáček J., Veselý J., Stuchlík E. (2001b): Sulphur and nitrogen fluxes and budgets in the Bohemian Forest and Tatra Mountains during the Industrial Revolution (1850–2000). *Hydrology and Earth System Sciences* 5(3): 391–405. DOI: 10.5194/hess-5-391-2001
- Krause-Dellin D., Steinberg Ch. (1984): Evidence of lake acidification by a novel biological pH-meter. *Environmental Technology Letters* 5: 403–406. DOI: 10.1080/09593338409384292
- Krause-Dellin D., Steinberg Ch. (1986): Cladoceran remains as indicators of lake acidification. *Hydrobiologia* 143: 129–134. DOI: 10.1007/978-94-009-4047-5_19
- Křížek M., Vočadlova K., Engel. Z. (2012): Cirque overdeepening and their relationship to morphometry. *Geomorphology* 139–140: 495–505. DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.11.014
- Kuneš P., Odgaard B. V., Gaillard M.-J. (2011): Soil phosphorus as a control of productivity and openness in temperate interglacial forest ecosystems. *Journal of Biogeography* 38: 2150–2164. DOI: 10.1111/j.1365-2699.2011.02557.x
- Kunský J. (1933): Zalednění Šumavy a šumavská jezera. Zvláštní otisk ze Sborníku Československé společnosti zeměpisné 39(1–4): 3–16.
- Lacoul P., Freedman B., Clair T. (2011): Effects of acidification on aquatic biota in Atlantic Canada. *Environmental Reviews* 19: 429–460. DOI: 10.1139/A11-016
- Lane C. S., Blockley S. P. E., Mangerud J., Smith V. C., Lohne Ø. S., Tomlinson E. L., Matthews I. P., Lotter A. F. (2012): Was the 12.1 ka Icelandic Vedde Ash one of a kind? *Quaternary Science Reviews* 33: 87–99. DOI: 10.1016/j.quascirev.2011.11.011
- Lane C. S., Lowe D. J., Blockley S. P. E., Suzuki T., Smith V. C. (2017): Advancing tephrochronology as a global dating tool: Applications in volcanology, archaeology, and palaeoclimatic research. *Quaternary Geochronology* 40: 1–7. DOI: 10.1016/j.quageo.2017.04.003

- Langheinrich U., Böhme D., Wegener U., Lüderitz V. (2002): Streams in the Harz National Parks (Germany) – a hydrochemical and hydrobiological evaluation. *Limnologica* 32: 309–321. DOI: 10.1016/S0075-9511(02)80022-6
- Lawfield A. M. W., Gingras M. K., Pemberton S. G. (2014): Microboring in a freshwater fluvial unionid bivalve substrate. *Ichnos* 21: 193–204. DOI: 10.1080/10420940.2014.934190
- LeCompte M. A., Goodyear A. C., Demitroff M. N., Batchelor D., Vogel E. K., Mooney Ch., Rock B. N., Seidel A. W. (2012): Independent evaluation of conflicting microspherule results from different investigations of the Younger Dryas impact hypothesis. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109(44): E2960–E2969. DOI: 10.1073/pnas.1208603109
- Leder J., Wenzel F., Daniell J. E., Gottschämmer E. (2017): Loss of residential buildings in the event of a re-awakening of the Laacher See Volcano (Germany). *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 337: 111–123. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2017.02.019
- Lian O. B., Roberts R. G. (2006): Dating the Quaternary: progress in luminescence dating of sediments. *Quaternary Science Reviews* 25: 2449–2468. DOI: 10.1016/j.quascirev.2005.11.013
- Libby W. F., Anderson E. C., Arnold J. R. (1949): Age determination by radiocarbon content: World-wide assay of natural radiocarbon. *Science* 109: 227–228. DOI: 10.1126/science.109.2827.227
- Liu D., Wang Y., Cheng H., Edwards R. L., Kong X. (2017): Remote vs. local control on the Preboreal Asian hydroclimate and soil processes recorded by an annually-laminated stalagmite from Daoguan Cave, southern China. *Quaternary International* 452: 79–90. DOI: 10.1016/j.quaint.2016.09.038
- Liu D., Wang Y., Cheng H., Edwards R. L., Kong X., Wang X., Wu J., Chen S. (2008): A detailed comparison of Asian Monsoon intensity and Greenland temperature during the Allerød and Younger Dryas events. *Earth and Planetary Science Letters* 272: 691–697. DOI: 10.1016/j.epsl.2008.06.008
- Lowe D. J. (2011): Tephrochronology and its application: A review. *Quaternary Geochronology* 6: 107–153. DOI: 10.1016/j.quageo.2010.08.003
- Ložek V. (1973): *Příroda ve čtvrtohorách*. Academia, Praha: 372 s.
- Ložek V. (2007): *Zrcadlo minulosti: Česká a slovenská krajina v kvartéru*. Dokořán, Praha: 198 s.
- Ložek V. (2011): *Po stopách pravěkých dějů: O silách, které vytvářely naši krajinu*. Dokořán, Praha: 181 s.
- Luoto T. (2010): Hydrological change in lakes inferred from midge assemblages through use of an intralake calibration set. *Ecological Monographs* 80(2): 303–329. DOI: 10.1890/09-0498.1
- Mahaney W. C., Keiser L., Krinsley D., Kalm V., Beukens R., West A. (2013): New Evidence from a Black Mat Site in the Northern Andes Supporting a Cosmic Impact 12,800 Years Ago. *The Journal of Geology* 121: 309–325. DOI: 10.1086/670652
- Mahaney W. C., Keiser L., Krinsley D., West A., Dirszowsky R., Allen Ch. C. R., Costa P. (2014): Recent developments in the analysis of the black mat layer and cosmic impact at 12.8 ka. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 96(1): 99–111. DOI: 10.1111/geoa.12033
- Mahaney W. C., Krinsley D. H., Milner M. W., Fischer R., Langworthy K. (2018a): Did the Black-Mat Impact/Airburst Reach the Antarctic? Evidence from New Mountain Near the Taylor Glacier in the Dry Valley Mountains. *The Journal of Geology* 126: 285–305. DOI: 10.1086/697248
- Mahaney W. C., Somelar P., West A., Krinsley D., Allen Ch. C. R., Pentlavalli P., Young J. M., Dohm J. M., LeCompte M., Kelleher B., Jordan S.F., Pulleyblank C., Dirszowsky R., Costa P. (2017): Evidence for cosmic airburst in the Western Alps archived in Late Glacial paleosols. *Quaternary International* 438: 68–80. DOI: 10.1016/j.quaint.2017.01.043

- Mahaney W. C., West A., Milan A., Krinsley D. H., Somelar P., Schwartz S., Milner M. W., Allen Ch. C. R. (2018b): Cosmic airburst on developing Allerød substrates (soils) in the Western Alps, Mt. Viso area. *Studia Quaternaria* 35(1): 3–23.
- Majer V., Cosby B. J., Kopáček J., Veselý J. (2003): Modelling reversibility of Central European mountain lakes from acidification: Part I - The Bohemian Forest. *Hydrology and Earth System Sciences* 7(4): 494–509. DOI: 10.5194/hess-7-494-2003
- Makos M., Rinterknecht V., Braucher R., Tołoczko-Pasek A., ASTER Team (2018): Last Glacial Maximum and Lateglacial in the Polish High Tatra Mountains - Revised deglaciation chronology based on the ^{10}Be exposure age dating. *Quaternary Science Reviews* 187: 130–156. DOI: 10.1016/j.quascirev.2018.03.006
- Mentlík P. (2004): Stav geomorfologických výzkumů v okolí Prášílského jezera a jeho další perspektivy. *Miscellanea geographica* 10: 1–15.
- Mentlík P. (2005): The preliminary results of research of accumulation glacial forms in the surroundings of Laka „lake“. *Miscellanea geographica* 11: 1–16.
- Mentlík P. (2006): Relative dating of glacial landforms in the surroundings of Prášílské Lake (Šumava Mts., Czech republic). *Geomorphologia Slovaca* 6: 45–54.
- Mentlík P., Engel Z., Brauchner R., Léanni L., ASTER Team (2013): Chronology of the Late Weichselian glaciation in the Bohemian Forest in Central Europe. *Quaternary Science Reviews* 65: 120–128. DOI: 10.1016/j.quascirev.2013.01.020
- Mentlík P., Minár J., Břízová E., Lisá L., Tábořík P., Stacke V. (2010): Glaciation in the surroundings of Prášílské Lake (Bohemian Forest, Czech Republic). *Geomorphology* 117: 181–194. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.12.001
- Mihu-Pintilie A., Asandulesei A., Nicu I. C., Stoleriu C. C., Romanescu G. (2016): Using GPR for assessing the volume of sediments from the largest natural dam lake of the Eastern Carpathians: Cujdel Lake, Romania. *Environmental Earth Sciences* 75(8): článek 710. DOI: 10.1007/s12665-016-5537-1
- Michler G. (2000a): Untersuchungen an Sedimentkernen aus Seen im Bayerischen und Böhmischem Wald. *Der Bayerische Wald* 14(1): 3–23.
- Michler G. (2000b): Untersuchungen an Sedimentkernen aus dem Großen Arbersee. *Der Bayerische Wald* 14(2): 3–16.
- Michler G. (2001): Untersuchungen an Sedimentkernen aus dem Schwarzen See (Černé jezero) und Teufelssee (Certovov jezero) im Böhmerwald (Tschechien). *Der Bayerische Wald* 15(2): 20–31.
- Mirosław-Grabowska J., Niska M. (2007): Reconstruction of environmental conditions of Eemian palaeolake at Studzieniec (Central Poland) on the basis of stable isotope and Cladocera analyses. *Quaternary International* 162: 195–204 DOI: 10.1016/j.quaint.2006.08.003
- Moldan F., Wright R. F., Löfgren S., Forsius M., Ruoho-Airola T., Skjelkvåle B. L. (2001): Long-term changes in acidification and recovery at nine calibrated catchments in Norway, Sweden and Finland. *Hydrology and Earth System Sciences* 5(3): 339–349. DOI: 10.5194/hess-5-339-2001
- Moore Ch. R., West A., LeCompte M. A., Brooks M., Daniel R. Jr., Goodyear A. C., Ferguson T. A., Ivester A. H., Faethers J. K., Kennett J. P., Tankersley K. B., Adediji V., Bunch T. E. (2017): Widespread platinum anomaly documented at the Younger Dryas onset in North American sedimentary sequences. *Scientific Reports* 7: článek 44031. DOI: 10.1038/srep44031
- Moser K. A., Baron J. S., Brahney J. a kol. (2019): Mountain lakes: Eyes on global environmental change. *Global and Planetary Change* 178: 77–95. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2019.04.001
- Mylona S. (1996): Sulphur dioxide emissions in Europe 1880-1991 and their effect on sulphur concentrations and depositions. *Tellus B* 48: 662–689. DOI: 10.1034/j.1600-0889.1996.t01-2-00005.x

- Nedbalová L., Vrba J., Fott J., Kohout L., Kopáček J., Macek M., Soldán T. (2006): Biological recovery of the Bohemian Forest lakes from acidification. *Biologia* 61(Suppl. 20): S453–S465. DOI: 10.2478/s11756-007-0071-y
- Neugebauer I., Brauer A., Dräger N., Dulski P., Wulf S., Plessen B., Mingram J., Herzsuh U., Brande A. (2012): A Younger Dryas varve chronology from the Rehwiese palaeolake record in NE-Germany. *Quaternary Science Reviews* (36): 91–102. DOI: 10.1016/j.quascirev.2011.12.010
- Norton S. A., Kopáček J., Fernandez I. J. (2013): Acid rain – acidification and recovery: 379–414. In: Turekian K. K., Holland H. D. (eds.): *Treatise on Geochemistry* 11 (2. vydání): Environmental Geochemistry. Elsevier, Oxford: 605 s.
- Norton S. A., Perry R. H., Saros J. E., Jacobson G. L. Jr., Fernandez I. J., Kopáček J., Wilson T. A., SanClemens M. D. (2011): The controls on phosphorus availability in a Boreal lake ecosystem since deglaciation. *Journal of Paleolimnology* 46: 107–122. DOI: 10.1007/s10933-011-9526-9
- Parts J. (1882): *Die Gletcher der Vorzeit in den Karpathen und den Mittelgebirgen Deutschlands nach fremden und eigenen Beobachtungen dargestellt*. Verlag von Wilhelm Koebner, Breslau: 198 s.
- Petaev M.I., Huang S., Jacobsen S. B., Zindler A. (2013): Large Pt anomaly in the Greenland ice core points to a cataclysm at the onset of Younger Dryas. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110(32): 12917–12920. DOI: 10.1073/pnas.1303924110
- Pfaffl F. (1986): Glazialmorphologische Untersuchungen an den Lachen im Arbergebiet/Bayerischer Wald. *Geologische Blätter für Nordostbayern und angrenzende Gebiete* 36: 269–278.
- Pfaffl F. (1988): Glazialmorphologische Untersuchungen am Rachel-Nordkar und am Großen Arbersee im Bayerischen Wald. *Geologische Blätter für Nordostbayern und angrenzende Gebiete* 38: 7–26.
- Pfaffl F. (1991): Alfred Rathsburg und Gerhard Engelmann – zwei bedeutende Glazialmorphologen des Bayerischen Waldes und des Böhmerwaldes. *Geologische Blätter für Nordostbayern und angrenzende Gebiete* 41: 217–220.
- Pfaffl F. (1997): Das Bärenriegel-Kar und seine Moränenlandschaft im Nationalpark Bayerischer Wald bei Finsterau. *Der Bayerische Wald* 11(2): 22–23.
- Pino M., Abarzúa A. M., Astorga G. a kol. (2019): Sedimentary record from Patagonia, southern Chile supports cosmic-impact triggering of biomass burning, climate change, and megafaunal extinctions at 12.8 ka. *Scientific Reports* 9: článek 4413. DOI: 10.1038/s41598-018-38089-y
- Pinter N., Scott A. C., Daulton T.L., Podoll A., Koeberl Ch., Anderson R. S., Ishman S. E. (2011): The Younger Dryas impact hypothesis: A requiem. *Earth-Science Reviews* 106: 247–264. DOI: 10.1016/j.earscirev.2011.02.005
- Pokorný P. (2002): A high-resolution record of Late-Glacial and Early-Holocene climatic and environmental change in the Czech Republic. *Quaternary International* 91: 101–122. DOI: 10.1016/S1040-6182(01)00105-7
- Pražáková M., Veselý J., Fott J., Majer V., Kopáček J. (2006): The long-term succession of cladoceran fauna and palaeoclimate forcing: A 14,600-year record from Plešné Lake, the Bohemian Forest. *Biologia* 61(Suppl. 20): S387–S399. DOI: 10.2478/s11756-007-0072-x
- **Procházka V., Mizera J., Kletetschka G., Vondrák D. (2019): Late Glacial sediments of the Stará Jímka paleolake and the first finding of Laacher See Tephra in the Czech Republic. *International Journal of Earth Sciences* 108(1): 357–378. DOI: 10.1007/s00531-018-1658-y
- Procházková L., Blažka P. (1999): Chemismus a oživení šumavských jezer na počátku 60-tých let. *Silva Gabreta* 3: 65–72.
- Raab T., Völkel J. (2002): Verbreitung und Altersstellung polygenetischer Hangsediment-Komplexe am Kleinen Arbersee im Hinteren Bayerischen Wald. *Berichte zur deutschen Landeskunde* 76(2/3): 131–149.

- Raab T., Völkel J. (2003): Late Pleistocene glaciation of the Kleiner Arbersee area in the Bavarian Forest, south Germany. *Quaternary Science Reviews* 22: 581–593. DOI: 10.1016/S0277-3791(02)00090-2
- Rasmussen S. O., Bigler M., Blockley S. P. a kol. (2014): A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: refining and extending the INTIMATE event stratigraphy. *Quaternary Science Reviews* 106: 14–28. DOI: 10.1016/j.quascirev.2014.09.007
- Rathsburg A. (1928): Die Gletscher des Böhmerwaldes zur Eiszeit. 22. Bericht der Naturwissenschaftlichen Gesellschaft zu Chemnitz: 161 s.
- Reimer P. J., Bard E., Byliss E. a kol. (2013): IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0-50,000 years cal BP. *Radiocarbon* 55(4): 1869–1887. DOI: 10.2458/azu_js_rc.55.16947
- Reissinger A. (1931): Schlammuntersuchungen am Schwarzen See im Böhmerwalde. *Berichte der Naturwissenschaftlichen Gesellschaft Bayreuth*. 3: 1–6.
- Reuther A. (2007): Surface exposure dating of glacial deposits from the Last Glacial Cycle: Evidence from Eastern Alps, the Bavarian Forest, the Southern Carpathians and the Altai Mountains. *Relief Boden Paläoklima – svazek 21*, Gebrüder Borntraeger, Berlin: 213 s.
- Riede F. (2016): Changes in mid- and far-field human landscape use following the Laacher See eruption (c. 13,000 BP). *Quaternary International* 394: 37–50. DOI: org/10.1016/j.quaint.2014.07.008
- Riede F., Andersen P., Price N. (2016): Does environmental archaeology need an ethical promise? *World Archaeology* 48(4): 466–481. DOI: 10.1080/00438243.2016.1192483
- Riede F., Bazely O., Newton A. J., Lane Ch. S. (2011): A Laacher See-eruption supplement to Tephabase: Investigating distal tephra fallout dynamics. *Quaternary International* 246: 134–144. DOI: 10.1016/j.quaint.2011.06.029
- Robock A. (2000): Volcanic eruptions and climate. *Reviews of Geophysics* 38(2): 191–219. DOI: 10.1029/1998RG000054
- Rosen M. R. (2015): The influence of hydrology on lacustrine sediment contaminant records: 5–34. In: Blais J. M., Rosen M. R., Smol J. P. (eds.): *Environmental contaminants: Using natural archives to track sources and long-term trends of pollution*. *Developments in Paleoenvironmental Research* 18, Springer, Dordrecht: 509 s. DOI: 10.1007/978-94-017-9541-8_2
- Salisbury E. J. (1922): Stratification and Hydrogen-Ion Concentration of the Soil in Relation to Leaching and Plant Succession with Special Reference to Woodlands. *Journal of Ecology* 9(2): 220–240. DOI: 10.1177/0959683607077046
- Schartau A. K., Moe J., Sandin L., McFarland B., Raddum G. (2008): Macroinvertebrate indicators of lake acidification: analysis of monitoring data from UK, Norway and Sweden. *Aquatic Ecology* 42: 293–305. DOI: 10.1007/s10452-008-9186-7
- Schillereff D. N., Chiverrell R. Ch., Macdonald N., Hooke J. M. (2014): Flood stratigraphies in lake sediments: A review. *Earth-Science Reviews* 135: 17–37. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.03.011
- Schmidt R., Arzet K., Facher E., Fott J., Irlweck K., Řeháková Z., Rose N., Štraškrábová V., Veselý J. (1993): Acidification of Bohemian Lakes: Recent trends and historical development. *Ost-West Programm – závěrečná zpráva*, Institut für Limnologie der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Mondsee: 86 s.
- Schmincke H.-U., Park C., Harms E. (1999): Evolution and environmental impacts of the eruption of Laacher See Volcano (Germany) 12,900 a BP. *Quaternary International* 61: 61–72. DOI: 10.1016/S1040-6182(99)00017-8
- Schneider J. (1976): Contributions to sedimentary geology 6: Biological and inorganic factors in the destruction of limestone coasts. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart: 112 s.

- Smol J. P., Birks H. J. B., Last W. M. (eds.) (2001a): Tracking Environmental Change Using Lake Sediments - Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht: 371 s.
- Smol J. P., Birks H. J. B., Last W. M. (eds.) (2001b): Tracking Environmental Change Using Lake Sediments - Volume 4: Zoological Indicators. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht: 218 s.
- Soldán T., Bojková J., Vrba J., Bitušík P., Chvojka P., Papáček M., Peltanová J., Sychra J., Táτοςová J. (2012): Aquatic insects of the Bohemian Forest glacial lakes: Diversity, long-term changes, and influence of acidification. *Silva Gabreta* 18(3): 123–283.
- Solem J. O., Birks H. H. (2000): Late-glacial and early-Holocene Trichoptera (Insecta) from Kråkenes Lake, western Norway. *Journal of Paleolimnology* 23(1): 49–56. DOI: 10.1023/A:1008064831048
- Stankiewicz B. A., Briggs D. E. G., Evershed R. P., Flannery M. B., Wuttke M. (1997): Preservation of chitin in 25-million-year-old fossils. *Science* 276: 1541–1543. DOI: 0.1126/science.276.5318.1541
- Steffanová P., Mentlík P. (2007): Comparison of morphometric characteristics of cirques in the Bohemian Forest. *Silva Gabreta* 13(3): 191–204.
- Steinberg Ch., Hartmann H., Arzet K., Krause-Dellin D. (1988): Paleoindication of acidification in Kleiner Arbersee (Federal Republic of Germany, Bavarian Forest) by chydorids, chrysophytes, and diatoms. *Journal of Paleolimnology* 1: 149–157. DOI: 10.1007/BF00196071
- *Stuchlík E., Bitušík P., Hardekopf D., Hořická Z., Kahounová M., Táτοςová J., Vondrák D., Dočkalová K. (2017) Complexity in the Biological Recovery of Tatra Mountain Lakes from Acidification. *Water Air Soil Pollut* 228: článek 184. DOI: 10.1007/s11270-017-3362-0
- Stuchlík E., Hořická Z., Prchalová M., Křeček J., Barica J. (1997): Hydrobiological investigation of three acidified reservoirs in the Jizera Mountains, the Czech Republic, during the summer stratification. *Canadian Technical Raport of Fisheries and Aquatic Sciences* 2155: 56–64.
- Stuiver M., Braziunas T. F., Grootes P. M. (1997): Is There Evidence for Solar Forcing of Climate in the GISP2 Oxygen Isotope Record? *Quaternary Research* 48: 259–266. DOI: 10.1006/qres.1997.1931
- Světlík I., Dreslerová D., Tomášková L. (2009): Postupy zpracování vzorků a radiouhlíkové datování. *Radioanalytické metody IAA /09./*, Praha: 30–39.
- Svobodová H., Soukupová L., Reille M. (2002): Diversified development of mountain mires, Bohemian Forest, Central Europe, in the last 13,000 years. *Quaternary International* 91: 123–135. DOI: 10.1016/S1040-6182(01)00106-9.
- Swiontek Brzezinska M., Lalke-Porczyk E., Donderski W. (2008): The role of chitinolytic bacteria and fungi in biodegradation of crustacean remains in lacustrine habitats. *Polish Journal of Ecology* 56(2): 335–342.
- Szeroczyńska K., Sarmaja-Korjonen K. (2007): Atlas of subfossil Cladocera from Central and Northern Europe. *Friends of Lower Vistula Society, Świecie*: 84 s.
- Šobr M., Janský B. (2016): The morphometric parameters of glacial lakes in the Bohemian Forest. *Silva Gabreta* 22: 31–61.
- Švambers V. (1914a): Šumavská jezera III. Prášilské jezero. *Rozpravy České Akademie císaře Františka Josefa pro vědy, slovesnost a umění, třída II.*, 23(16): 1–19.
- Švambers V. (1914b): Šumavská jezera IV. Laka. *Rozpravy České Akademie císaře Františka Josefa pro vědy, slovesnost a umění, třída II.*, 23(20): 1–8.
- Tarrant P., Cañedo-Argüelles M., Rieradevall M., Prat N. (2018): The influence of depth and macrophyte habitat on paleoecological studies using chironomids: Enol Lake (Spain) as a case study. *Journal of Paleolimnology* 60: 97–107. DOI: 10.1007/s10933-018-0026-z

- Tátosová J., Veselý J., Stuchlík E. (2006): Holocene subfossil chironomid stratigraphy (Diptera: Chironomidae) in the sediment of Plešné Lake (the Bohemian Forest, Czech Republic): Palaeoenvironmental implications. *Biologia* 61(Suppl. 20): S401–S411. DOI: 10.2478/s11756-007-0076-6
- Tietze E., Esquis K. S. (2018): First record of cyanobacteria microboring activity in pampean shallow lakes of Argentina: *Revista Brasileira de Paleontologia* 21(2): 187–193. DOI: 10.4072/rbp.2018.2.08
- Thines M. (2018): Oomycetes. *Current Biology* 28: R803–R825. DOI: 10.1016/j.cub.2018.05.062
- Traczyk A. (2004): Late Pleistocene evolution of periglacial and glacial relief in the Karkonosze Mountains. *Acta Universitatis Carolinae Geographica* 39(1): 59–72.
- Tribollet A., Radtke G., Golubic S. (2011): Bioerosion: 117–134 In: Reitner J., Thiel V. (eds.): *Encyclopedia of Geobiology*. Springer, Dordrecht: 927 s.
- Tribollet A., Veinott G., Golubic S., Dart, R. (2008): Infestation of the North American freshwater mussel *Elliptio complanata* (Head Lake, Canada) by the euendolithic cyanobacterium *Plectonema terebrans* Bornet et Flahault. *Algological Studies* 128: 65–77. doi: 10.1127/1864-1318/2008/0128-0065
- Ungermanová L., Kolaříková K., Stuchlík E., Senoo T., Horecký J., Kopáček J., Chvojka P., Tátosová J., Bitušík P., Fjellheim A. (2014): Littoral macroinvertebrates of acidified lakes in the Bohemian Forest. *Biologia, Bratislava* 69(9): 1190–1201. DOI: 10.2478/s11756-014-0420-6
- van den Bogaard P., Schmincke H.-U. (1984): The Eruptive Center of the Late Quaternary Laacher See Tephra. *Geologische Rundschau* 73(3): 933–980. DOI: 10.1007/BF01820883
- van den Bogaard P., Schmincke H.-U. (1985): Laacher See Tephra: A widespread isochronous late Quaternary tephra layer in central and northern Europe. *Geological Society of America Bulletin* 96(12): 1554–1571. DOI: 10.1130/0016-7606(1985)96<1554:LSTAWI>2.0.CO;2
- van Hoesel A., Hoek W. Z., Pennock G. M., Drury M. R. (2014): The Younger Dryas impact hypothesis: a critical review. *Quaternary Science Reviews* 83: 95–114. DOI: 10.1016/j.quascirev.2013.10.033
- van Raden U. J., Colombaroli D., Gilli A., Schwander J., Bernasconi S.M., van Leeuwen J., Leuenberger M., Eicher U. (2013): High-resolution late-glacial chronology for the Gerzensee lake record (Switzerland): $\delta^{18}\text{O}$ correlation between a Gerzensee-stack and NGRIP. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 391(část B): 13–24. DOI: 10.1016/j.palaeo.2012.05.017
- Veselý J. (1994): Investigation of the nature of the Šumava Lakes: A review. *Časopis Národního Muzea, Praha, Řada Přírodovědná* 163: 103–120.
- Veselý J. (1998): Changes in vegetation of the Černé Lake area inferred from pollen analysis of lake sediment: period between 3400 BC and 1600 AD. / Změny vegetace v širším okolí Černého jezera v období mezi 3400 př. n. l. a 1600 n. l. *Silva Gabreta* 2: 141–153.
- Veselý J. (2000): The history of metal pollution recorded in the sediments of Bohemian Forest lakes: Since the Bronze Age to the present. *Silva Gabreta* 4: 147–166.
- Vočadlova K., Křížek M. (2005): Glacial landforms in the erné jezero Lake area. *Miscellanea geographica* 11: 45–62.
- Vočadlova K., Křížek M. (2009): Comparison of glacial relief landforms and the factors which determine glaciation in the surroundings of Černé jezero Lake and Čertovo jezero Lake (Šumava Mts., Czech Republic). *Moravian Geographical Reports* 17(2): 2–14.
- Vočadlova K., Petr L., Žáčková P., Křížek M., Křížová L., Hutchinson S. M., Šobr M. (2015): The Lateglacial and Holocene in Central Europe: a multi-proxy environmental record from the Bohemian Forest, Czech Republic. *Boreas* 44: 769–784. DOI: 10.1111/bor.12126

*Vondrák D., Kletetschka G., Hrubá J., Nábělek L., Procházka V., Svitavská Svobodová H., Bobek P., Hořická Z., Kadlec J., Takáč M., Stuchlík E. (2017): Sediment of a central European lake implies an extraterrestrial impact at the Younger Dryas onset. 80th Annual Meeting of the Meteoritical Society 2017 (LPI Contrib. No. 1987) / Meteoritics & Planetary Science 52(S1): abstrakt A373. DOI: 10.1111/maps.12934

**Vondrák D., Kopáček J., Kletetschka G., Chattová B., Suchánek V., Tátošová J., Kuneš P. (2019a): Litostratigrafie a stáří sedimentů šumavských jezer: prvotní zhodnocení / Lithostratigraphy and age of the Bohemian Forest lake sediments: A first assessment. Geoscience Research Reports 52(1): 75–83. DOI: 10.3140/zpravy.geol.2019.13

*Vondrák D., Prach J., Houfková P. (2015): Sedimenty postglaciálních jezer v ČR – unikátní přírodní archívy (českou) limnologií přehlížené / Sediments of postglacial lakes in the Czech Republic – unique natural archives overlooked by (Czech) limnology: 162–167 In: Rádková V., Bojková J. (eds.): XVII. konference České limnologické společnosti a Slovenskej limnologickej spoločnosti „Voda – věc veřejná“ - Sborník příspěvků. Mikulov 29.6.-3.7.2015, Česká limnologická společnost a Masarykova univerzita v Brně, Brno: 200 s.

**Vondrák D., Schafstall N. B., Chvojka P., Chiverrell R. Ch., Kuosmanen N., Tátošová J., Clear J. L. (2019b, in press): Postglacial succession of caddisfly (Trichoptera) assemblages in a central European montane lake. Biologia. DOI: 10.2478/s11756-019-00249-4

Vrba J., Bojková J., Chvojka P., Fott J., Kopáček J., Macek M., Nedbalová L., Papáček M., Rádková V., Sacherová V., Soldán T., Šorf M. (2016): Constraints on the biological recovery of the Bohemian Forest lakes from acid stress. Freshwater Biology 61: 376–395. DOI: 10.1111/fwb.12714

Vrba J., Kopáček J., Fott J. (2000): Long-term limnological research of the Bohemian Forest lakes and their recent status. Silva Gabreta 4: 7–28.

Vrba J., Kopáček J., Tahovská K., Šantrůčková H. (2015): Long-term ecological research of glacial lakes in the Bohemian Forest and their catchments. Silva Gabreta 21(1): 53–71.

Waringer J., Graf W. (2011): Atlas der mitteleuropäischen Köcherfliegenlarven/Atlas of Central European Trichoptera Larvae. Erik Mauch Verlag, Dinkelscherben: 468 s.

Williams N. (1988): The use of caddisflies (Trichoptera) in palaeoecology. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology 61(1-4): 493–500. DOI: 10.1016/0031-0182(88)90069-7

Wisshak M. (2012): Microbioerosion: 213–243 In: Knaust D., Bromley R. G. (eds.): Trace Fossils as Indicators of Sedimentary Environments: Developments in Sedimentology 64. Elsevier, Amsterdam: 960 s.

Wittke J. H., Weaver J.C., Bunch T. E. a kol. (2013): Evidence for deposition of 10 million tonnes of impact spherules across four continents 12,800 y ago. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 110(23): E2088–E2097. DOI: 10.1073/pnas.1301760110

Wolbach W. S., Ballard J. P., Mayewski P. A. a kol. (2018a): Extraordinary Biomass-Burning Episode and Impact Winter Triggered by the Younger Dryas Cosmic Impact ~12,800 Years Ago. 1. Ice Cores and Glaciers. The Journal of Geology 126: 165–184. DOI: 10.1086/695703

Wolbach W. S., Ballard J. P., Mayewski P. A. a kol. (2018b): Extraordinary Biomass-Burning Episode and Impact Winter Triggered by the Younger Dryas Cosmic Impact ~12,800 Years Ago. 2. Lake, Marine, and Terrestrial Sediments. The Journal of Geology 126: 185–205. DOI: 10.1086/695704

Wörner G., Schmincke H.-U. (1984): Mineralogical and chemical zonation of the Laacher See tephra sequence (East Eifel, W. Germany). Journal of Petrology 25(4): 805–835. DOI: 10.1093/petrology/25.4.805

Wu Y., Sharma M., LeCompte M. A., Demitroff M. N., Landis J. D. (2013): Origin and provenance of spherules and magnetic grains at the Younger Dryas boundary. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 110(38): E3557–E3566. doi: 10.1073/pnas.1304059110

Wu J. Y., Wang Y. J., Cheng H., Kong X. G., Liu D. B. (2012): Stable isotope and trace element investigation of two contemporaneous annually-laminated stalagmites from northeastern China surrounding the “8.2 ka event”. *Climate of the Past* 8: 1497–1507. DOI: 10.5194/cp-8-1497-2012

Wulf S., Ott F., Słowiński M., Noryśkiewicz A. M., Dräger N., Martin-Puertas C., Czymzik M., Neugebauer I., Dulski P., Bourne A. J., Błaczkiwicz M., Brauer A. (2013): Tracing the Laacher See tephra in the varved sediment record of the Trzechowskie palaeolake in central northern Poland. *Quaternary Science Reviews* 76: 129–139. DOI: 10.1016/j.quascirev.2013.07.010

Internetové zdroje:

Geovědní mapy České geologické služby (ČGS), Praha, přístup dne 24.4.2019, dostupné z:
<<https://mapy.geology.cz/geocr50/>>

Geovědní mapy (Geoviewer) Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, přístup dne 24.4.2019, dostupné z:
<https://geoviewer.bgr.de/mapapps/resources/apps/geoviewer/index.html?lang=en&tab=geologie&cover=geologie_guek_200&lod=8>